

Leibniz Universität Hannover
Fakultät für Mathematik und Physik
Institut für Angewandte Mathematik

Diplomarbeit

Ein hierarchischer Fehlerschätzer für
Hindernisprobleme

von Cornelius Rüther
Matr.-Nr.: 2517350

10. Dezember 2014

Erstprüfer: Prof. Dr. Gerhard Starke
Zweitprüfer: Prof. Dr. Peter Wriggers

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	vi
Tabellenverzeichnis	viii
Algorithmenverzeichnis	ix
Quellcodeverzeichnis	x
1 Einleitung	11
2 Grundlagen	15
2.1 Hilberträume	15
2.2 Variationsformulierung	17
2.3 Finite Elemente Methode	26
2.3.1 A priori Fehlerabschätzung	33
2.4 Adaptive Verfeinerungsstrategien	36
2.4.1 A posteriori Fehlerschätzer	36
2.4.2 Verfeinerung des Netzes	37
2.5 Einführung in die Strukturmechanik	39
2.5.1 Kinematik	39
2.5.2 Kinetik	42
2.5.3 Konstitutive Gleichungen und Prinzipien	43
3 Variationsungleichungen	45
3.1 Ein Hindernisproblem	45
3.1.1 Variationsformulierung für das Hindernisproblem . . .	46
3.1.2 Existenz und Eindeutigkeit der Lösung	49
3.1.3 Lösung des Hindernisproblems mittels FEM	51
3.2 Kontaktprobleme	58
3.2.1 Mathematische Modellierung eines Kontaktproblems .	58
3.2.2 Variationsformulierung des Signorini-Kontaktproblems	62
3.2.3 Lösung des Kontaktproblems mittels FEM	67

4 Ein hierarchischer Fehlerschätzer für Hindernisprobleme	69
4.1 Herleitung von einem hierarchischen a posteriori Fehlerschätzer	70
4.1.1 Diskretisierung des Defektproblems	70
4.1.2 Lokaler Anteil des Fehlerschätzers	77
4.1.3 Oszillationsterme	82
4.1.4 Zuverlässigkeit des Fehlerschätzers	85
4.1.5 Effizienz des Fehlerschätzers	100
4.2 Ein adaptiver Algorithmus	103
4.3 Erfüllung einer Saturationseigenschaft	104
4.4 Übertragung des Fehlerschätzers auf Kontaktprobleme	107
5 Implementierung des Fehlerschätzers in Matlab	111
5.1 Implementierung eines Hindernisproblems	111
5.2 Implementierung eines Kontaktproblems	119
6 Validierung	124
6.1 Numerische Beispiele zum Hindernisproblem	124
6.2 Numerisches Beispiel zum Kontaktproblem	134
7 Zusammenfassung und Ausblick	138
Literaturverzeichnis	140
A Funktionalanalysis	144
A.1 Sobolev-Räume	144
A.2 Optimalitätskriterien	146
A.3 Konvergenzbegriffe	147
B Optimierung	149
B.1 Quadratische Programmierung	149
B.2 Active Set-Methode für konvexe QPs	150
B.3 Algorithmus	154
C Tensorrechnung	155
C.1 Tensoralgebra	155
C.2 Tensoranalysis	157
D Quellcode	159
D.1 Implementierung des Fehlerschätzers für das Hindernisproblem	159
D.2 Implementierung des Fehlerschätzers für das Kontaktproblem	183
Index	197
Selbstständigkeitserklärung	200

Abbildungsverzeichnis

1.1	Auslenkung einer eingespannten Membran unter Einwirkung einer vertikalen Lastfunktion f	13
2.1	Membran Ω mit Flächenlast f und Auslenkung $u(x)$	17
2.2	Zulässige und unzulässige Triangulierung	29
2.3	Dreiecke für nodale Basen (linear, quadratisch, kubisch)	30
2.4	Triangulierung von $\Omega = [-1, 1]^2$ in 8 Courant-Elemente	31
2.5	Referenzelement \tilde{T} für ein allgemeines Dreieck $T \in \mathcal{T}_h$	33
2.6	Verfeinerungen von Dreiecken	38
2.7	Konfiguration eines Kontinuums \mathcal{B}	39
3.1	Ein Hindernisproblem mit Hindernis ψ , konstanter Streckenlast f und Lösung u	46
3.2	Körper \mathcal{B}^1 und \mathcal{B}^2 mit Randbezeichnungen	59
3.3	Kontaktformulierung zwischen zwei Körpern	59
4.1	Beispiel eines affinen Hindernisses ψ mit $v \in \mathcal{A}_{\mathcal{Q}}$ in \mathbb{R}	74
4.2	Dreiecke T_1 und T_2 mit Einheitsnormalen \mathbf{n}	79
4.3	Darstellung von ω_p (grau) und \mathcal{E}_p (abgehende Kanten von p) für ein beliebiges ϕ_p	80
5.1	Veranschaulichung der Lage der Stützstellen in einem allgemeinen Dreieck für die Gauß-Quadratur	116
6.1	Exakte und numerische Lösung des Beispiels 6.1	125
6.2	Gitterverfeinerung für das Hindernisproblem im Beispiel 6.1 mit $\theta_1 = 0,4$ und $\theta_2 = 0,3$	126
6.3	Diagramm mit dem Fehler und der Oszillation für Beispiel 6.1	128
6.4	Numerische Lösung des Beispiels 6.2 in der Verfeinerungsstufe 7 mit $\theta_1 = \theta_2 = 0,3$	129
6.5	Netzverfeinerungen für das Beispiel 6.2 mit $\theta_1 = \theta_2 = 0,3$	130
6.6	Diagramm mit dem Fehler und der Oszillation für Beispiel 6.2	130
6.7	Numerische Lösung des Beispiels 6.3 mit $\theta_1 = \theta_2 = 0,3$	132
6.8	Netzverfeinerungen für das Beispiel 6.3 mit $\theta_1 = \theta_2 = 0,3$	132

Abbildungsverzeichnis

6.9	Diagramm mit dem Fehler und der Oszillation für Beispiel 6.3	133
6.10	Darstellung von Beispiel 6.4 (Hertz'sches Kontaktproblem)	134
6.11	Diagramm mit dem Fehler für Beispiel 6.4	136
6.12	Netzverfeinerungen für das Beispiel 6.4 mit $\theta = 0,35$	137
6.13	Abbildung der x - und y -Komponenten des Verschiebungsfeldes von Beispiel 6.4 mit $\theta = 0,35$	137

Tabellenverzeichnis

2.1	Ableitungen der nodalen Basisfunktion ϕ_5	31
5.1	Stützstellen (ξ_k, η_k) und Gewichte w_k für die Gauß-Quadratur über das Referenzdreieck \tilde{T}	115
6.1	Vergleich von adaptiver und uniformer Verfeinerung für Beispiel 6.1	127
6.2	Vergleich von adaptiver und uniformer Verfeinerung für Beispiel 6.2	129
6.3	Vergleich von adaptiver und uniformer Verfeinerung für Beispiel 6.3	131
6.4	Vergleich von adaptiver und uniformer Verfeinerung für Beispiel 6.4	136

Algorithmenverzeichnis

4.1	Adaptive Verfeinerungsstrategie für ein Hindernisproblem . . .	103
B.1	Active-Set-Methode für konvexe quadratische Probleme . . .	154

Quellcodeverzeichnis

D.1	Assemblierung von Matrix und Vektor	159
D.2	Berechnung der lokalen Anteile von ρ_S	160
D.3	Lösung des lokalen Defektproblems (4.9)	161
D.4	Dreiecksindizes zur Verfeinerung	163
D.5	Gradientenberechnung	164
D.6	Bestimmung der inneren Knoten $\mathcal{N} \cap \Omega$	165
D.7	Bestimmung der inneren Kontaktknoten \mathcal{N}^0	165
D.8	Bestimmung der inneren Nicht-Kontaktknoten \mathcal{N}^+	165
D.9	Bestimmung der Menge \mathcal{N}^{++}	165
D.10	Berechnung der Menge an Knoten aus \mathcal{N}^{0+} und \mathcal{N}^{0-}	166
D.11	Bestimmung der lokalen Steifigkeitsmatrix	167
D.12	Berechnung der Indizes anliegender Dreiecke	168
D.13	Bestimmung der Mittelpunkte und Zuordnung zu den Dreiecken	169
D.14	Berechnung der Normalflüsse j_E für alle $E \in \mathcal{E}_p$	170
D.15	Bestimmung der Oszillation $\text{osc}_1(u_S, \psi)$	171
D.16	Berechnung der Oszillationsterme $\text{osc}_2(u_S, \psi, f)$	172
D.17	Gewichte und Stützstellen für die Quadratur	173
D.18	Adaptive Verfeinerung des Gitters und Lösung des Hindernisproblems	174
D.19	Startdatei (Beispiel 6.1)	176
D.20	Startdatei (Beispiel 6.2)	178
D.21	Startdatei (Beispiel 6.3)	181
D.22	Assemblierung von Matrix und Vektor für das Kontaktproblem	183
D.23	Berechnung der lokalen Anteile von ρ_S	186
D.24	Berechnung der lokalen Steifigkeitsmatrix für das Kontaktproblem	188
D.25	Bestimmung des Normalenspannungsflusses über eine Kante E	189
D.26	Gewichte und Stützstellen für die Quadratur über eine Kante	190
D.27	Adaptive Verfeinerung des Gitters und Lösung des Kontaktproblems	191
D.28	Startdatei (Beispiel 6.4)	194

Kapitel 1

Einleitung

Partielle Differentialgleichungen sind in vielen Bereichen der Natur- und Ingenieurwissenschaften wiederzufinden. Da die exakte Lösung nicht immer existiert, bzw. die Bestimmung solch einer Lösung beliebig kompliziert werden kann, haben numerische Löser für partielle Differentialgleichungen in den letzten Jahrzehnten immer mehr an Bedeutung gewonnen. Insbesondere ist dies durch die Weiterentwicklung der Computertechnologie und verfügbaren Rechenleistung begründet. Die Lösung kann daher z.B. mittels Galerkin-Verfahren (bzw. Finiter-Elemente-Methode) ermittelt werden. Hierbei wird die eigentliche Differentialgleichung nur noch approximativ auf einem Gitter gelöst, wobei wir durch Verfeinerung des Gitters die Genauigkeit der Lösung erhöhen, was allerdings auch zu höherem Rechenaufwand führt. Daher ist es sinnvoll, die Verfeinerung des Gitters gerade so zu steuern, dass möglichst wenig, aber für eine hinreichend genaue Lösung noch genügend Elemente verfeinert werden. Diese Verfahren werden als *adaptive Verfeinerungsstrategien* bezeichnet und sind im Allgemeinen von der Form:

solve → estimate → mark → refine.

Da die exakte Lösung in den meisten Fällen nicht bekannt ist, ist der Schritt „estimate“ von entscheidender Bedeutung. Hierbei wird der Fehler zur exakten Lösung auf dem nächsten Gitter mittels eines a posteriori Fehlerschätzer bzgl. des aktuellen Gitters abgeschätzt, was Zuverlässigkeit und Effizienz des Schätzers voraussetzt. Dadurch wird sichergestellt, dass durch Verringerung des Fehlerschätzers auch der exakte Fehler kleiner wird.

Es gibt fünf Klassen von a posteriori Fehlerschätzern (vgl. [Bra13]):

- Residuale Schätzer,
- Schätzer über ein lokales Neumann-Problem,
- Schätzer über ein lokales Dirichlet-Problem,
- Schätzer durch Mittelung,

1. Einleitung

- Hierarchische Schätzer.

Die in der Literatur am häufigsten verwendete Klasse sind die residualen a posteriori Fehlerschätzer (vgl. bspw. [Bra13], [Bra05], [BCH07], [BCH09], [MNS00]). In der vorliegenden Arbeit wollen wir einen hierarchischen Fehlerschätzer untersuchen. Solche Schätzer basieren auf einer Hierarchie von Ansatzräumen, d.h. man untersucht das gegebene Problem in einem „besseren“ Finite-Element-Raum und schätzt damit den Fehler bzgl. der „schlechteren“ Galerkin-Approximation ab. Der dadurch entstehende Fehlerschätzer wird dann in lokale Anteile bzgl. der Elemente des Gitters aufgeteilt. Damit können im Schritt „mark“ genau diejenigen Elemente ausgewählt werden, die an dem berechneten Schätzer einen hohen lokalen Anteil haben, d.h. verfeinere diejenigen Elemente T , für die

$$\sum_T \eta_T \geq \theta \eta$$

gilt, wobei η_T die lokalen Anteile des Schätzers η darstellen und $\theta \in (0, 1)$ ein gegebener Parameter ist, der ein Verhältnis der zu verfeinernden Elemente angibt.

Diese Verfeinerungsstrategie wollen wir in der vorliegenden Arbeit zunächst für ein Hindernisproblem untersuchen. Ein Modellproblem eines Hindernisproblems stellt z.B. eine in einem Gebiet Ω eingespannte Membran dar, die mit einer Last f vertikal belastet und deren Auslenkung $u : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ durch ein Hindernis ψ behindert wird. Da die in der Membran gespeicherte Energie minimal ist, kann man die Auslenkung dieser durch ein Optimierungsproblem von der Form

$$u = \arg \min_{v \in K} J(v) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \nabla v \cdot \nabla v \, dx - \int_{\Omega} f v \, dx \quad (1.1)$$

modellieren, wobei K die Menge der Auslenkungen u ist, die oberhalb des Hindernisses ψ liegen, d.h. $u \geq \psi$ erfüllen. In Abbildung 1.1 sind im Vergleich die Auslenkungen einer auf einem Kreisgebiet belasteten Membran ohne und mit (ebenem) Hindernis dargestellt. Für das Problem (1.1) werden wir in Kapitel 4.1 einen wie oben beschriebenen hierarchischen a posteriori Fehlerschätzer herleiten, wobei wir die lokale Aufteilung des Schätzers bzgl. der Knoten, nicht der Elemente T , des verwendeten Gitters untersuchen werden. Das Hauptresultat dieser Arbeit befindet sich in Theorem 4.22, welches die Verwendung des Schätzers ermöglicht. In diesem Hauptresultat werden wir zeigen, dass der betrachtete a posteriori Fehlerschätzer eine obere Schranke für den exakten Fehler $J(u_S) - J(u)$ im Energiefunktional J aus (1.1) bis auf Terme höherer Ordnung (Oszillationsterme) darstellt.

Nachdem wir in Kapitel 4 einen hierarchischen a posteriori Fehlerschätzer für das Modellproblem (1.1) untersucht haben, wollen wir diesen auf Kontaktprobleme übertragen. Für residuale a posteriori Fehlerschätzer sind diese

1. Einleitung

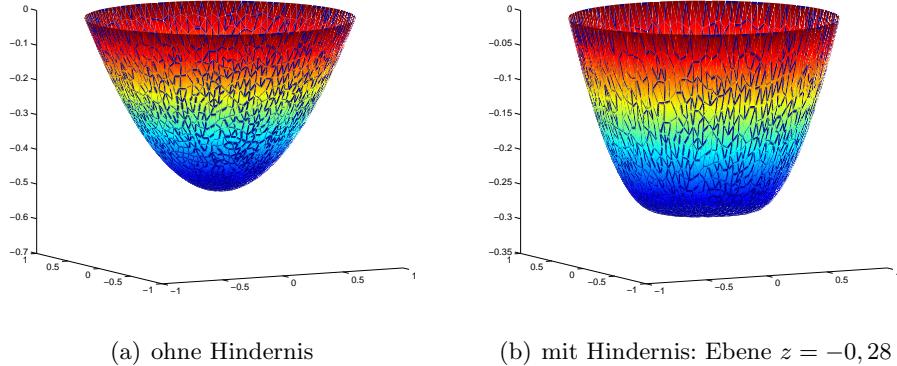


Abbildung 1.1: Auslenkung einer eingespannten Membran unter Einwirkung einer vertikalen Lastfunktion f

bereits in der Literatur (vgl. z.B. [CSW99], [Wri06] und [HJ99]) vielfältig untersucht worden. Daher wollen wir ein Kontaktproblem für den in dieser Arbeit eingeführten hierarchischen Fehlerschätzer untersuchen.

Kontaktprobleme sind Probleme aus der Strukturmechanik und stellen eine Anwendung von partiellen Differentialgleichungen unter Nebenbedingung (nämlich der Kontaktbedingung) dar. Wir werden uns in dieser Arbeit mit einem vereinfachten Kontaktproblem, dem *Signorini-Kontaktproblem* beschäftigen, d.h. es gibt keine Reibungskräfte auf der Kontaktfläche. Außerdem werden wir von einem linear elastischen Fall ausgehen, d.h. das Hooke'sche Gesetz gilt. Die Lösung eines Kontaktproblems kann wie oben eindeutig (vgl. Kapitel 3.2) durch die Minimierung des Energiefunktional

$$\mathcal{J}(\mathbf{v}) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{v}) : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{v}) d\Omega - \int_{\Omega} \mathbf{b} \cdot \mathbf{v} d\Omega - \int_{\Gamma} \mathbf{t} \cdot \mathbf{v} d\Gamma \quad (1.2)$$

über \mathcal{K} berechnet werden, wobei die Menge \mathcal{K} diejenigen Verschiebungsfelder \mathbf{v} enthält, die die Kontaktbedingung $\mathbf{v} \cdot \mathbf{n} - g \leq 0$ erfüllen. Die Funktion g gibt hierbei die Lücke zwischen den beiden Körpern an und wird daher auch als *Gap-Funktion* bezeichnet. Diese stellt für Problem (1.2) also das Hindernis dar, wie zuvor ψ für (1.1). In Kapitel 4.4 werden dann die Übertragungen der Konzepte des Fehlerschätzers für Problem (1.1) beschrieben. Weiter stellt $\boldsymbol{\sigma}$ die Spannung, $\boldsymbol{\varepsilon}$ die Verzerrung und \mathbf{b} die Volumenlast (z.B. Gewichtskraft) im vorliegenden Körper dar, der durch Ω beschriebenen wird. Die Funktion \mathbf{t} beschreibt eine Oberflächenlast, die auf den Körper wirkt.

Zunächst werden wir jedoch in Kapitel 3 zeigen, dass die beiden Probleme (1.1) und (1.2) grundlegend auf dieselben Variationsungleichungen führen und die Existenz einer eindeutigen Lösung für solch eine Variationsungleichung, und damit auch für die jeweiligen Probleme, zeigen.

1. Einleitung

Zuvor werden in Kapitel 2 grundlegende Konzepte zu Hilberträumen, Variationsrechnung, adaptive Verfeinerungsstrategien und der Strukturmechanik eingeführt. Weitere Resultate, die in der vorliegenden Arbeit verwendet werden und nicht in Kapitel 2 aufgeführt sind, können in Anhang A (Funktionalanalysis), B (Optimierung) und C (Tensorrechnung) nachgeschlagen werden.

Die Lösungsverfahren für die adaptive Verfeinerung der Hindernis- bzw. Kontaktprobleme werden in Matlab implementiert und die wichtigsten Vorgehensweisen hierfür in Kapitel 5 beschrieben. Der Quellcode ist im Detail im Anhang D einzusehen.

In Kapitel 6 werden wir abschließend mehrere Beispiele für Hindernis- bzw. Kontaktprobleme präsentieren, welche die Resultate aus Kapitel 4 untermauern.

Kapitel 2

Grundlagen

In diesem Kapitel wollen wir uns mit grundlegender Theorie beschäftigen, die nicht im Anhang aufgeführt, zum Verständnis der darauffolgenden Kapitel jedoch notwendig ist.

Dieses Kapitel basiert auf [Bra13], [Sta08], [Ste12b], [Wal11], [Alt12].

2.1 Hilberträume

Wir benötigen für die Variationsrechnung Hilberträume und wollen uns daher in diesem Kapitel mit wichtigen Eigenschaften solcher Räume im Allgemeinen beschäftigen. Zunächst führen wir ein, was wir unter einem Hilbertraum verstehen.

Definition 2.1. Ein *Hilbertraum* ist ein reeller oder komplexer Vektorraum H mit Skalarprodukt $(\cdot, \cdot)_H$, der vollständig bzgl. der durch das Skalarprodukt induzierten Norm, $\|v\|_H^2 := (v, v)_H$ für alle $v \in H$, ist, d.h. in dem jede Cauchy-Folge konvergiert.

Beispiel. Es sei $H = \mathbb{R}^n$ und $(\cdot, \cdot)_H : \mathbb{R}^n \times \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ definiert durch das Standardskalarprodukt. Dann konvergiert jede Cauchy-Folge in H bzgl. der durch $(\cdot, \cdot)_H$ induzierten (euklidischen) Norm (vgl. [Kö00], metrische Räume) und damit ist H ein Hilbertraum.

Wir wollen die im Folgenden aufgeführten Eigenschaften später auf weniger triviale Räume anwenden, vor allem den Funktionenraum $H_0^1(\Omega)$ (s. Anhang A, Sobolev-Räume). Es sei in diesem Kapitel H ein reeller Hilbertraum mit Skalarprodukt $(\cdot, \cdot)_H$ und der dazu induzierten Norm $\|v\|_H^2 = (v, v)_H$ für alle $v \in H$.

Bemerkung. Für alle $v, w \in H$ gilt die Cauchy-Schwarz'sche Ungleichung

$$(v, w)_H \leq \|v\|_H \|w\|_H .$$

2. Grundlagen

Da wir uns in dieser Arbeit mit Variationsproblemen über konvexen abgeschlossenen Mengen beschäftigen werden, sammeln wir zunächst einige Aussagen bzgl. dieser Mengen.

Satz 2.2 (Approximationssatz). *Es sei $\emptyset \neq M \subset H$ konvex und abgeschlossen. Dann existiert für alle $v \in H$ ein $m_v \in M$ mit*

$$\|v - m_v\|_H = \text{dist}(v, M) := \inf_{w \in M} \|v - w\|_H.$$

Wir nennen $P_M : H \rightarrow M$ mit $v \mapsto m_v$ die Projektionen auf M .

Beweis. Der Beweis ist in [Wal11] Kapitel 7.1 Satz 7.2 zu finden. \square

Satz 2.3 (Charakterisierung der Projektionen). *$\emptyset \neq M \subset H$ sei konvex, abgeschlossen und $v \in H$. Dann gilt:*

$$m_0 = P_M(v) \iff (m - m_0, v - m_0)_H \leq 0$$

für alle $m \in M$.

Beweis. Es sei o.B.d.A. $0 \in M$ und $m_0 = 0$.

„ \Rightarrow “ Wegen $0 = P_M(x)$ muss $\|v - tm\|_H \geq \|v\|_H$ für $m \in M$ und $0 \leq t \leq 1$ sein. Dann ist

$$\|v\|_H^2 \leq \|v\|_H^2 - 2t(v, m)_H + t^2\|m\|_H^2 \implies 0 \leq -2t(v, m)_H + \underbrace{t^2\|m\|_H^2}_{\geq 0}.$$

Damit ist $2(v, m)_H \leq 0$.

„ \Leftarrow “ Für alle $m \in M$ ist $(v, m)_H \leq 0$. Es folgt

$$\|v\|_H^2 \leq \|v\|_H^2 + \|m\|^2 - 2(v, m)_H = \|v - m\|_H^2.$$

Wegen $0 \in M$ ist $\text{dist}(v, M) = \|v\|_H^2$ und damit $0 = P_M(v)$. \square

Satz 2.4. *Es sei $\emptyset \neq M \subset H$ konvex und abgeschlossen. Dann gilt:*

$$\|P_M(v) - P_M(w)\|_H \leq \|v - w\|_H \quad \forall v, w \in H.$$

Beweis. Da $P_M(v), P_M(w) \in M$ für alle $v, w \in H$ ist, folgt aus Satz 2.3

$$(P_M(w) - P_M(v), v - P_M(v))_H \leq 0, \tag{2.1}$$

$$(P_M(v) - P_M(w), w - P_M(w))_H \leq 0. \tag{2.2}$$

Addieren wir (2.1) und (2.2), so erhalten wir

$$\begin{aligned} 0 &\geq (P_M(w) - P_M(v), v - P_M(v))_H + (P_M(v) - P_M(w), w - P_M(w))_H \\ &= (P_M(w) - P_M(v), v - w + P_M(w) - P_M(v))_H \\ &= \|P_M(w) - P_M(v)\|_H^2 - (P_M(w) - P_M(v), w - v)_H \\ &\stackrel{\text{C.S.}}{\geq} \|P_M(w) - P_M(v)\|_H^2 - \|P_M(w) - P_M(v)\|_H \|w - v\|_H. \end{aligned}$$

Nach Umstellen der Ungleichung folgt die Behauptung. \square

Definition 2.5. Es sei $\emptyset \neq M \subset H$ und wir definieren das *orthogonale Komplement* von M durch

$$M^\perp := \{v \in H \mid v \perp M\} := \{v \in H \mid (v, m)_H = 0 \forall m \in M\}.$$

Satz 2.6. Es sei M ein abgeschlossener Untervektorraum von H . Dann ist

$$H = M \oplus M^\perp,$$

d.h. jedes $v \in M$ hat eine eindeutige Zerlegung $v = v_M + v_{M^\perp}$ mit $v_M \in M$ und $v_{M^\perp} \in M^\perp$.

Beweis. Der Beweis findet sich in [Wal11] Kapitel 7.1 Theorem 7.6. \square

Korollar 2.7. Es sei $\emptyset \neq M \subset H$ ein Untervektorraum. Dann ist der Abschluss $\bar{M} = H$ genau dann, wenn $M^\perp = \{0\}$ ist.

Beweis. Man kann zeigen, dass $\overline{\text{span } M} = (M^\perp)^\perp =: M^{\perp\perp}$ ist und dann folgt unter Verwendung von Satz 2.6 die Behauptung. Den kompletten Beweis können wir in [Wal11] Kapitel 7.1 Korollar 7.7 (iii) einsehen. \square

2.2 Variationsformulierung

Bevor wir uns mit Variationsproblemen auf konvexen Teilmengen eines Hilbertraumes beschäftigen, wollen wir die Variationsrechnung an einem einfachen Modellproblem ohne Nebenbedingung beschreiben.

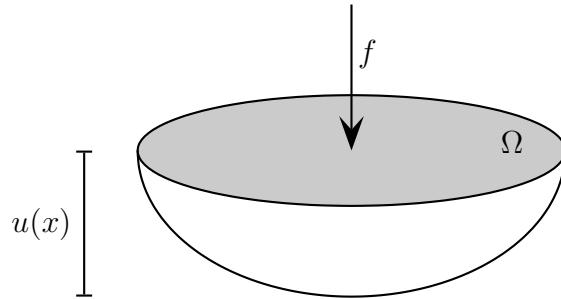


Abbildung 2.1: Membran Ω mit Flächenlast f und Auslenkung $u(x)$

Wir betrachten als Modellproblem die Auslenkung $u : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ einer in $\Omega \subset \mathbb{R}^d$ eingespannten Membran unter Krafteinwirkung f . Mathematisch beschrieben wird dies durch das *Dirichlet-Problem*

$$-\Delta u = f \text{ in } \Omega, \tag{2.3a}$$

$$u = g \text{ auf } \partial\Omega, \tag{2.3b}$$

dabei ist $g : \partial\Omega \rightarrow \mathbb{R}$ eine für die Randwerte von u gegebene Funktion.

2. Grundlagen

Notation. In der Praxis übliche Dimensionen sind $d = 2, 3$. Der Einfachheit halber sei im Folgenden $d = 2$ und $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ ein durch ein Polygonzug berandetes Gebiet, wobei wir den Rand $\partial\Omega$ auch mit Γ bezeichnen.

Bemerkung. Sollte Ω ein allgemein berandetes Gebiet sein, so können wir dieses beliebig genau durch ein polygonales Gebiet approximieren; hierbei entsteht schon bei der Gebietszerlegung ein Fehler.

Diesen Fehler kann man durch Verwendung von *isoparametrischen Elementen* (vgl. [Bra13] Kapitel III, §2, Isoparametrische Elemente) verringern. Dies soll in dieser Arbeit aber nicht weiter vertieft werden.

Es sei $u_0 : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ eine für das Dirichlet-Problem zulässige Funktion, d.h. die für (2.3) hinreichend regulär ist und für die $u_0 = g$ auf Γ gilt. Dann gilt für $\tilde{u} = u - u_0$

$$-\Delta \tilde{u} = \tilde{f} \text{ in } \Omega, \quad (2.4a)$$

$$\tilde{u} = 0 \text{ auf } \Gamma \quad (2.4b)$$

mit $\tilde{f} = f - \Delta u_0$. Also reicht es aus, sich auf das *homogene Dirichlet-Problem* (2.4) zu beschränken. Im Folgenden betrachten wir somit (2.3) mit $g \equiv 0$.

Mit $H_0^1(\Omega)$ bezeichnen wir, wie in Bemerkung A.8 im Anhang beschrieben, den Raum der in Ω einmal schwach differenzierbaren Funktionen, die am Rand Γ verschwinden im Sinne der Spur. Wählen wir nun ein beliebiges $v \in H_0^1(\Omega)$, dann folgt durch Multiplikation von (2.3a) mit v und Integration über Ω die Beziehung

$$\int_{\Omega} -\Delta u \cdot v \, dx = \int_{\Omega} f v \, dx.$$

Wir betrachten nun (2.3a) also nicht mehr punktweise (lokal), sondern im gewichteten Mittel über ganz Ω (global). Durch Anwenden der 1. Green'schen Formel (C.4) (bzw. dem Satz von Gauß) ergibt sich

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} \nabla u \cdot \nabla v \, dx - \underbrace{\int_{\Gamma} v \partial_{\nu} u \, ds}_{=0, \text{ da } v|_{\Gamma}=0} &= \int_{\Omega} f v \, dx \\ \iff \int_{\Omega} \nabla u \cdot \nabla v \, dx &= \int_{\Omega} f v \, dx. \end{aligned} \quad (2.5)$$

Die Gleichung (2.5) wird als *Variationsgleichung* bezeichnet. Wenn wir die Notationen aus Satz A.5 (b) verwenden, so können wir (2.5) kurz schreiben als

$$(\nabla u, \nabla v)_0 = (f, v)_0,$$

damit definieren wir die Bilinearform $a : (H_0^1(\Omega))^2 \rightarrow \mathbb{R}$, $a(u, v) := (\nabla u, \nabla v)_0$ und $(f, v) := (f, v)_0$.

2. Grundlagen

Bemerkung. Wir werden in dieser Arbeit oftmals auch $a(\cdot, \cdot)$ für eine beliebige Bilinearform $a : H \times H \rightarrow \mathbb{R}$ verwenden.

Definition 2.8. Eine Funktion $u \in H_0^1(\Omega)$ heißt *schwache Lösung* vom homogenen Dirichlet-Problem

$$\begin{aligned} -\Delta u &= f \text{ in } \Omega, \\ u &= 0 \text{ auf } \Gamma, \end{aligned} \tag{DP}$$

wenn die Gleichung

$$a(u, v) = (f, v) \quad \forall v \in H_0^1(\Omega) \tag{2.6}$$

gilt.

Anschaulich nennen wir eine solche Lösung schwach, da sie das Problem (DP) nur im gewichteten Mittel löst. Eine schwache Lösung muss das *starke Problem* nicht lösen, da sie beispielsweise die Regularitätsanforderungen an das Problem nicht erfüllen muss.

Wir wollen uns nun die Frage nach der Eindeutigkeit und Existenz einer Lösung für die Variationsgleichung (2.6) stellen. Diese Frage wollen wir zunächst allgemein für einen beliebigen reellen Hilbertraum H beantworten. Wie wir nachher im Beweis des zentralen Satzes von Lax-Milgram sehen werden, ist hierfür explizit ein Hilbertraum notwendig.

Zuvor benötigen wir allerdings noch ein paar Definitionen und Eigenschaften für Bilinearformen.

Definition 2.9. Sei H ein Hilbertraum. Die Bilinearform $a : H \times H \rightarrow \mathbb{R}$ heißt *stetig*, falls mit einem $c > 0$

$$|a(u, v)| \leq c \|u\|_H \|v\|_H \quad \forall u, v \in H$$

gilt. Sie heißt *H -elliptisch* (oder kurz *elliptisch* oder *koerziv*), falls es ein $\alpha > 0$ gibt, so dass

$$a(v, v) \geq \alpha \|v\|_H^2 \quad \forall v \in H$$

gilt.

Da man die Variationsgleichung (2.6) auch aus der Minimierung eines quadratischen Energiefunktionalen $J : (H_0^1(\Omega))^2 \rightarrow \mathbb{R}$, $J(v) := \frac{1}{2}a(v, v) - (f, v)$ herleiten kann, wollen wir für ein solches Funktional zuvor einige Eigenschaften sammeln.

Lemma 2.10. *Es sei H ein Hilbertraum. Das Funktional*

$$J : H \rightarrow \mathbb{R}, \quad J(v) := \frac{1}{2}a(v, v) - F(v),$$

ist konvex, wobei $a : H \times H \rightarrow \mathbb{R}$ eine stetige bilineare koerzive und $F : H \rightarrow \mathbb{R}$ eine lineare Abbildung ist.

2. Grundlagen

Beweis. Es seien $u, v \in H$, dann gilt $u+t(v-u) = (1-t)u+tv \in H$ (dies gilt auch, wenn wir den Satz auf eine konvexe Teilmenge $M \subset H$ beschränken). Damit folgt mit $t \in [0, 1]$:

$$\begin{aligned}
J((1-t)u+tv) &= \frac{1}{2}a((1-t)u+tv, (1-t)u+tv) - F((1-t)u+tv) \\
&= (1-t)J(u) + tJ(v) + \frac{1}{2}a((1-t)u+tv, (1-t)u+tv) \\
&\quad - \frac{1}{2}(1-t)a(u, u) - \frac{1}{2}ta(v, v) \\
&= (1-t)J(u) + tJ(v) + \frac{1}{2}a(u, u) + ta(u, v-u) \\
&\quad + \frac{t^2}{2}a(v-u, v-u) - \frac{1}{2}(1-t)a(u, u) - \frac{1}{2}ta(v, v) \\
&= (1-t)J(u) + tJ(v) + \frac{t^2}{2}a(v-u, v-u) \\
&\quad + ta(u, v) - \frac{1}{2}ta(u, u) - \frac{1}{2}ta(v, v) \\
&\quad \underbrace{- \frac{1}{2}ta(v-u, v-u)}_{=-\frac{1}{2}ta(v-u, v-u)} \\
&= (1-t)J(u) + tJ(v) - \underbrace{\frac{1}{2}t(1-t)}_{\geq 0} \underbrace{a(v-u, v-u)}_{\geq \alpha \|v-u\|_H^2 \geq 0} \\
&\leq (1-t)J(u) + tJ(v).
\end{aligned}$$

Daraus folgt die Behauptung. \square

Lemma 2.11. Sei H ein Hilbertraum. Das Funktional $J : H \rightarrow \mathbb{R}$, $J(v) = \frac{1}{2}a(v, v) - F(v)$ aus Lemma 2.10 ist Gâteaux-differenzierbar (s. Definition A.10).

Beweis. Wir rechnen einfach nach, dass der Grenzwert des Differenzenquotienten existiert und verwenden dabei die Bilinearität von a und die Linearität von F . Seien $u, v \in H$, dann gilt

$$\begin{aligned}
\mathcal{D}_v J(u) &= \lim_{t \rightarrow 0} \frac{J(u+tv) - J(u)}{t} \\
&= \lim_{t \rightarrow 0} \frac{J(u) + t(a(u, v) - F(v)) + \frac{t^2}{2}a(v, v) - J(u)}{t} \\
&= \lim_{t \rightarrow 0} (a(u, v) - F(v)) + \frac{t}{2}a(v, v) \\
&= a(u, v) - F(v) < \infty,
\end{aligned}$$

da a und F jeweils stetig sind und daher durch $\|u\|_H, \|v\|_H$ beschränkt sind. Damit folgt die Behauptung. \square

2. Grundlagen

Nun können wir die Existenz und Eindeutigkeit einer Lösung durch das folgende Theorem zeigen.

Theorem 2.12 (Lax-Milgram). *Es sei H ein Hilbertraum und $a : H \times H \rightarrow \mathbb{R}$ eine symmetrische, in H stetige, koerzive Bilinearform. Weiter sei $F : H \rightarrow \mathbb{R}$ ein stetiges lineares Funktional, d.h.*

$$|F(v)| \leq c \|v\|_H \quad \forall v \in H$$

mit einer Konstante $c > 0$. Dann gibt es eine eindeutige Lösung $u \in H$, für die

$$a(u, v) = F(v) \quad \forall v \in H.$$

gilt. Diese minimiert den Ausdruck

$$J(v) = \frac{1}{2}a(v, v) - F(v)$$

unter allen $v \in H$.

Beweis. (i) Zunächst zeigen wir die Äquivalenz der beiden oberen Probleme.

„ \Rightarrow “ Es sei $u \in H$, so dass $a(u, v) = F(v) \forall v \in H$. Für $t > 0$ und $v \in H$ gilt dann

$$\begin{aligned} J(u + tv) &= \frac{1}{2}a(u + tv, u + tv) - F(u + tv) \\ &= \frac{1}{2}a(u, u) + t a(u, v) + \frac{t^2}{2}a(v, v) - F(u) - t F(v) \\ &= \frac{1}{2}a(u, u) - F(u) + t \underbrace{(a(u, v) - F(v))}_{=0} + \frac{t^2}{2} \underbrace{a(v, v)}_{\geq 0, \text{ da } a \text{ koerziv}} \\ &> \frac{1}{2}a(u, u) - F(u) = J(u), \end{aligned}$$

also ist $u = \arg \min_{v \in H} J(v)$.

„ \Leftarrow “ Es sei $u \in H$ das Minimum von dem Problem

$$\min_{v \in H} J(v) = \frac{1}{2}a(v, v) - F(v).$$

Da $J : H \rightarrow \mathbb{R}$ nach Lemma 2.10 ein konvexes Funktional ist und J nach Lemma 2.11 Gâteaux-differenzierbar, gilt mit Satz A.11 für alle $v \in H$

$$\begin{aligned} 0 &= \mathcal{D}_v J(u) = \frac{d}{dt} J(u + tv) \Big|_{t=0} \\ &= \frac{d}{dt} (J(u) + t(a(u, v) - F(v)) + \frac{t^2}{2}a(v, v)) \Big|_{t=0} \\ &= a(u, v) - F(v) + t a(v, v) \Big|_{t=0} = a(u, v) - F(v) \end{aligned}$$

2. Grundlagen

(ii) Eindeutigkeit: Es seien $u, \tilde{u} \in H$ Lösungen der Variationsgleichung, d.h.

$$a(u, v) = F(v) \wedge a(\tilde{u}, v) = F(v) \quad \forall v \in H.$$

Damit folgt durch Subtraktion der beiden Gleichungen für alle $v \in H$

$$a(u, v) = a(\tilde{u}, v) \iff a(u - \tilde{u}, v) = 0. \quad (2.7)$$

Da H ein Vektorraum ist, gilt auch $u - \tilde{u} \in H$. Ersetzen wir also in (2.7) $v = u - \tilde{u}$, dann ergibt sich

$$0 = a(u - \tilde{u}, u - \tilde{u}) \stackrel{a \text{ koerziv}}{\geq} \underbrace{\alpha}_{>0} \|u - \tilde{u}\|_H^2 \geq 0 \implies \|u - \tilde{u}\|_H^2 = 0,$$

also folgt $u = \tilde{u}$.

(iii) Existenz: Die Existenz einer Lösung weisen wir über das Funktional nach.

$$\begin{aligned} J(v) &= \frac{1}{2}a(v, v) - F(v) \stackrel{a \text{ koerziv}}{\geq} \underbrace{\frac{1}{2}\alpha\|v\|_H^2}_{F \text{ linear}} - c\|v\|_H \\ &= \frac{1}{2}\alpha \left(\|v\|_H^2 - \frac{2c}{\alpha}\|v\|_H \right) = \frac{1}{2}\alpha \left(\|v\|_H - \frac{c}{\alpha} \right)^2 - \frac{c^2}{2\alpha} \\ &\geq -\frac{c^2}{2\alpha} \end{aligned}$$

Folglich ist J nach unten beschränkt. Sei $\eta := \inf\{J(v) \mid v \in H\}$ und $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge mit $J(v_n) \rightarrow \eta$ für $n \rightarrow \infty$, dann folgt mit der Koerzivität von a

$$\begin{aligned} \alpha\|v_n - v_m\|_H^2 &\leq a(v_n - v_m, v_n - v_m) \\ &= a(v_n, v_n) + a(v_m, v_m) - a(v_n, v_m) - a(v_m, v_n) \\ &= 2a(v_n, v_n) + 2a(v_m, v_m) - \underbrace{a(v_n, v_n + v_m) + a(v_m, v_n + v_m)}_{=-a(v_n+v_m, v_n+v_m)} \\ &= 2a(v_n, v_n) - 4F(v_n) + 2a(v_m, v_m) - 4F(v_m) \\ &\quad - a(v_n + v_m, v_n + v_m) + 4F(v_n + v_m) \\ &= 4J(v_n) + 4J(v_m) - 4a\left(\frac{v_n + v_m}{2}, \frac{v_n + v_m}{2}\right) + 8F\left(\frac{v_n + v_m}{2}\right) \\ &= 4J(v_n) + 4J(v_m) - 8J\left(\frac{v_n + v_m}{2}\right) \\ &\leq 4J(v_n) + 4J(v_m) - 8\eta \xrightarrow{n, m \rightarrow \infty} 4\eta + 4\eta - 8\eta = 0, \end{aligned}$$

d.h. $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$ ist eine Cauchy-Folge. Da H ein Hilbertraum ist, gilt somit: $\exists u \in H : v_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} u$ mit $J(u) = \eta$. \square

Um die allgemeine Aussage aus dem Theorem von Lax-Milgram auf unser Modellproblem (2.6) übertragen zu können, benötigen wir die *Poincaré-Friedrichs-Ungleichung*, die auch später noch eine zentrale Rolle für den hierarchischen Fehlerschätzer spielen wird.

Satz 2.13 (Poincaré-Friedrichs-Ungleichung). *Es sei Ω in einem d -dimensionalen Würfel der Kantenlänge $s > 0$ enthalten. Dann gilt*

$$\|v\|_0 \leq s \|\nabla v\|_0 \quad \forall v \in H_0^1(\Omega),$$

wobei $\|\cdot\|_0$ die durch das Skalarprodukt $(\cdot, \cdot)_0$ induzierte Norm ist.

Beweis. Der Beweis ist in [Bra13] Kapitel II, §1 Sobolev-Räume, Satz 1.5 oder [Sta08] Satz 1.5 zu finden. \square

Bemerkung 2.14. Für die Gültigkeit der Poincaré-Friedrichs-Ungleichung muss v nicht auf ganz Γ gleich Null sein, sondern es reicht aus, dass

$$v \in H_{\Gamma_u}^1(\Omega) := \{v \in H^1(\Omega) \mid v = 0 \text{ auf } \Gamma_u\}$$

mit $\Gamma_u \subset \Gamma$ ist, wobei mit einem Maß μ gilt: $\mu(\Gamma_u) \neq 0$, d.h. Γ_u ist keine Nullmenge (vgl. [Bra13] Kapitel II, §1, Bemerkung 1.6).

Jetzt können wir mittels Theorem 2.12 überprüfen, ob Problem (2.6) mit $a : (H_0^1(\Omega))^2 \rightarrow \mathbb{R}, a(u, v) = (\nabla u, \nabla v)_0$ und $F : H_0^1(\Omega) \rightarrow \mathbb{R}, F(v) := (f, v)$ eine eindeutige Lösung hat. Es seien $u, v \in H_0^1(\Omega)$, dann gilt

$$\begin{aligned} a(v, v) &= \int_{\Omega} \nabla v \nabla v \, dx = \|\nabla v\|_0^2 \\ &\geq \frac{s^2 + 1}{(1+s)^2} \|\nabla v\|_0^2 \stackrel{\text{Satz 2.13}}{\geq} \frac{1}{(1+s)^2} (\|v\|_0^2 + \|\nabla v\|_0^2) \\ &= \frac{1}{(1+s)^2} \|v\|_1^2. \end{aligned}$$

Damit ist a mit $\alpha := \frac{1}{(1+s)^2}$ koerativ. Weiter rechnen wir unter Verwendung der Cauchy-Schwarz-Ungleichung nach:

$$\begin{aligned} |a(u, v)| &= \left| \int_{\Omega} \nabla u \nabla v \, dx \right| \leq \sum_{i=1}^d \int_{\Omega} |\partial_i u| |\partial_i v| \, dx \\ &\stackrel{\text{C.S.}}{\leq} \sum_{i=1}^d \left(\int_{\Omega} |\partial_i u|^2 \, dx \right)^{\frac{1}{2}} \left(\int_{\Omega} |\partial_i v|^2 \, dx \right)^{\frac{1}{2}} \\ &\leq \left(\sum_{i=1}^d \int_{\Omega} |\partial_i u|^2 \, dx \right)^{\frac{1}{2}} \left(\sum_{i=1}^d \int_{\Omega} |\partial_i v|^2 \, dx \right)^{\frac{1}{2}} \\ &\leq \left(\int_{\Omega} |\nabla u|^2 \, dx + \int_{\Omega} u^2 \, dx \right)^{\frac{1}{2}} \left(\int_{\Omega} |\nabla v|^2 \, dx + \int_{\Omega} v^2 \, dx \right)^{\frac{1}{2}} \\ &= \|u\|_1 \|v\|_1, \end{aligned}$$

2. Grundlagen

d.h. a ist stetig mit $c := 1$. Die Symmetrie von a ist trivial, also bleibt nur noch die Stetigkeit von F zu zeigen. Es sei $v \in H_0^1(\Omega)$, dann gilt

$$\begin{aligned} |F(v)| = |(f, v)| &= \left| \int_{\Omega} f v \, dx \right| \stackrel{\text{C.S.}}{\leq} \left(\int_{\Omega} |f|^2 \, dx \right)^{\frac{1}{2}} \left(\int_{\Omega} |v|^2 \, dx \right)^{\frac{1}{2}} \\ &\leq c \left(\int_{\Omega} \underbrace{|\nabla v|^2}_{\geq 0} + |v|^2 \, dx \right)^{\frac{1}{2}} = c \|v\|_1 \end{aligned}$$

mit $0 < c := (\int_{\Omega} |f|^2 \, dx)^{\frac{1}{2}} < \infty$, wenn $f \in L_2(\Omega)$ ist. Damit ist F ein stetiges lineares Funktional und somit existiert nach Theorem 2.12 eine eindeutige Lösung $u \in H_0^1(\Omega)$ für die schwache Formulierung des homogenen Dirichlet-Problems.

Weiter minimiert die Lösung $u \in H_0^1(\Omega)$ auch das Funktional

$$J(v) = \frac{1}{2} \int_{\Omega} \nabla v \cdot \nabla v \, dx - \int_{\Omega} f v \, dx,$$

welches die gespeicherte Energie der durch die Kraft f belasteten, in Ω eingespannten Membran beschreibt.

Bemerkung. Die Stetigkeit der Linearform F zeigt, dass die Kraft f aus dem Dirichlet-Problem wenigstens quadratisch integrierbar, also in $L^2(\Omega)$, sein muss, damit es eine schwache Lösung geben kann.

Notation. (a) Mit H' bezeichnen wir den Dualraum zum Hilbertraum H .

(b) Den Dualraum zu $H^1(\Omega)$ bezeichnen wir mit $H^{-1}(\Omega)$.

Als Folgerung aus dem Theorem von Lax-Milgram betrachten wir den nächsten Satz.

Satz 2.15 (Riesz'scher Darstellungssatz). *Es sei H ein Hilbertraum mit einem Skalarprodukt $(\cdot, \cdot)_H$. Es sei $F \in H'$, dann existiert genau ein $u \in H$, so dass*

$$(u, v)_H = F(v) \quad \forall v \in H.$$

Beweis. Dies ist eine direkte Folgerung aus dem Theorem 2.12. Die Abbildung $(\cdot, \cdot)_H : H \times H \rightarrow \mathbb{R}$ ist als Skalarprodukt bilinear, symmetrisch und positiv definit, damit auch bzgl. der auf H durch das Skalarprodukt induzierten Norm $\|v\|_H := \sqrt{(v, v)_H}$, koerziv. F ist als Element des Dualraumes H' eine lineare, stetige Abbildung $F : H \rightarrow \mathbb{R}$ und damit folgt mit $a(\cdot, \cdot) := (\cdot, \cdot)_H$ aus dem Theorem von Lax-Milgram die Behauptung. \square

Lemma 2.16. *Es sei H ein Hilbertraum mit Skalarprodukt $(\cdot, \cdot)_H$ und $a : H \times H \rightarrow \mathbb{R}$ eine stetige koerzive Bilinearform. Dann existiert genau ein linearer Operator $A : H \rightarrow H$, so dass gilt:*

$$a(u, v) = (Au, v)_H \quad \forall u, v \in H.$$

2. Grundlagen

Beweis. Es sei $u \in H$ fest, dann ist $L : H \rightarrow \mathbb{R}, L(v) := a(u, v)$ eine lineare Abbildung, die stetig ist, da

$$|L(v)| = |a(u, v)| \stackrel{\text{stetig}}{\leq} c \|u\|_H \|v\|_H = \tilde{c} \|v\|_H$$

mit $0 < \tilde{c} := c \|u\|_H$ gilt. Damit folgt nach dem Darstellungssatz von Riesz, dass es ein eindeutiges $l \in H$ gibt, so dass

$$a(u, v) = L(v) = (l, v)_H \quad \forall v \in H$$

gilt. Da $u \in H$ jedoch beliebig ist, bleibt zu zeigen, dass es ein eindeutiges $A : H \rightarrow H$ gibt, so dass $Au = l$ ist.

Wir zeigen zunächst mithilfe der Bilinearform a , dass A linear ist. Es gilt für $\lambda, \mu \in \mathbb{R}$ und $u, v \in H$

$$\begin{aligned} (A(\lambda u + \mu v), w)_H &= a(\lambda u + \mu v, w) = \lambda a(u, w) + \mu a(v, w) \\ &= \lambda(Au, w)_H + \mu(Av, w)_H \\ &= (\lambda Au + \mu Av, w)_H \end{aligned}$$

für alle $w \in H$. Weiter gilt

$$\|Au\|_H^2 = (Au, Au)_H = a(u, Au) \stackrel{\text{stetig}}{\leq} c \|u\|_H \|Au\|_H,$$

d.h. $\|Au\|_H \leq c \|u\|_H$ und damit ist nach [Wer11] Satz II.1.2 (oder vgl. auch [Kö00] Kapitel 1.3) der Operator A stetig.

Betrachten wir den Kern von A , so ergibt sich

$$\ker A := \{v \in H \mid Av = 0\} = \{0\}, \tag{2.8}$$

denn

$$\alpha \|v\|_H^2 \stackrel{\text{koerziv}}{\leq} a(v, v) = (Av, v)_H \stackrel{\text{CS}}{\leq} \|Av\|_H \|v\|_H$$

und damit gilt $\|Av\|_H \geq \alpha \|v\|_H$, d.h. $Av = 0 \Leftrightarrow v = 0$. Dies impliziert, dass A injektiv ist, denn mit $v_1, v_2 \in H, Av_1 = Av_2$ folgt

$$0 = Av_1 - Av_2 = A(v_1 - v_2) \xrightarrow{(2.8)} v_1 = v_2.$$

Weiter betrachten wir das Bild von A , d.h.

$$\text{im } A := \{v \in H \mid \exists u \in H : Au = v\} \subset H.$$

Sei $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge mit $v_k \in \text{im}(A)$ für alle $k \in \mathbb{N}$. Dann folgt, dass für jedes v_k ein $u_k \in H$ existiert mit $Au_k = v_k$. Es gelte, dass $Au_k = v_k \rightarrow v \in H$ geht, dann folgt

$$\begin{aligned} \alpha \|u_n - u_m\|_H &\leq \|A(u_n - u_m)\|_H = \|Au_n - Au_m\|_H \\ &= \|v_n - v_m\|_H \xrightarrow{n, m \rightarrow \infty} 0, \end{aligned}$$

d.h. $(u_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset H$ ist eine Cauchy-Folge und konvergiert daher in H . Also existiert ein $u \in H$ mit $u_n \rightarrow u$. Mit der Stetigkeit von A folgt dann

$$v_n = Au_n \xrightarrow{n \rightarrow \infty} Au = v,$$

d.h. $v \in \text{im}(A)$ und damit ist $\text{im}(A)$ abgeschlossen. Wir betrachten nun ein $v \in H$ mit $v \perp \text{im } A \subset H$, dann gilt

$$(Au, v)_H = 0 \quad \forall u \in H.$$

Damit folgt mit $u = v \in H$ oben eingesetzt

$$0 = (Av, v)_H = a(v, v) \geq \alpha \|v\|_H^2 \implies v = 0.$$

Also besteht der zu $\text{im}(A)$ orthogonale Raum nur aus dem Nullelement und mit Korollar 2.7 gilt dann $\text{im } A = \overline{\text{im } A} = H$. Damit ist A bijektiv.

Es seien nun $0 \neq l \in H$ sowie $A_1, A_2 \in \mathcal{L}(H, H)$ zwei lineare Operatoren mit $A_1 u = l$ und $A_2 u = l$, die nach der obrigen Weise konstruiert sind. Dann gilt

$$0 = A_1 u - A_2 u = (A_1 - A_2)u \implies A_1 = A_2,$$

da $u \neq 0$ und die Summe zweier bijektiver linearer Operatoren wieder bijektiv ist, also ist ein so konstruierter Operator eindeutig. \square

2.3 Finite Elemente Methode

Für unser Modellproblem kann man zeigen, dass es für bestimmte Gebiete Ω eine exakte, d.h. analytische, Lösung gibt (vgl. [Wal11] Kapitel 5). Solch eine Lösung muss im Allgemeinen nicht für jedes Problem bekannt oder gar berechenbar sein. Daher wollen wir nicht mehr die exakte Lösung von unserer Variationsgleichung (2.6) berechnen, sondern eine Approximation davon, die sogenannte *Galerkin-Approximation*.

Unter dem *Galerkin-Verfahren* verstehen wir, dass wir die Variationsgleichung

$$a(u, v) = F(v) \quad \forall v \in H \tag{2.9}$$

nur noch auf einem endlich dimensionalen Unterraum $V_h \subset H$ lösen wollen, d.h. finde $u_h \in V_h$, so dass

$$a(u_h, v_h) = F(v_h) \quad \forall v_h \in V_h. \tag{2.10}$$

Satz 2.17. *Das Galerkin-Verfahren (2.10) hat eine eindeutige Lösung.*

Beweis. Da V_h als Unterraum von H auch ein Hilbertraum ist und die Eigenschaften von a, F weiterhin erfüllt sind, gilt auch hier der Satz von Lax-Milgram, was die Eindeutigkeit und Existenz einer Lösung sichert. \square

2. Grundlagen

Da V_h ein endlich dimensionaler Unterraum von H ist, wird jener von einer endlichen Basis $\mathcal{B}_h := \{\phi_1, \dots, \phi_N\}$ aufgespannt, d.h. für $u_h \in V_h$ gilt:

$$\exists! \boldsymbol{\mu} \in \mathbb{R}^N : u_h(x) = \sum_{i=1}^N \mu_i \phi_i(x). \quad (2.11)$$

Da $F(\cdot), a(u, \cdot)$ linear sind und alle $v_h \in V_h$ wie in (2.11) darstellbar sind, ist das Galerkin-Verfahren (2.10) äquivalent zum Problem

$$a(u_h, \phi_i) = F(\phi_i) \quad \forall i = 1, \dots, N,$$

mit u_h wie in (2.11) beschrieben. Ersetzen wir u_h in der Bilinearform durch (2.11), so ergibt sich

$$a(u_h, \phi_i) = a\left(\sum_{j=1}^N \mu_j \phi_j, \phi_i\right) = \sum_{j=1}^N \mu_j a(\phi_j, \phi_i),$$

also

$$\sum_{j=1}^N \mu_j a(\phi_j, \phi_i) = F(\phi_i) \quad \forall i = 1, \dots, N.$$

Damit erhalten wir ein lineares Gleichungssystem

$$A\boldsymbol{\mu} = \mathbf{f}$$

mit $A = [a(\phi_j, \phi_i)]_{i,j=1}^N$, $\boldsymbol{\mu} = [\mu_i]_{i=1}^N$ und $\mathbf{f} = [F(\phi_i)]_{i=1}^N$. Dieses Gleichungssystem gilt es zu lösen, um die gesuchten Koordinaten $\mu_i, i = 1, \dots, N$, bzgl. der Basis \mathcal{B}_h für die approximierte Lösung u_h zu finden.

In den Ingenieurwissenschaften, insbesondere bei kontinuumsmechanischen Problemen, wird A als *Steifigkeitsmatrix* bezeichnet.

Bemerkung 2.18. Ist die Bilinearform a symmetrisch, so ist es auch die Matrix A , denn

$$a_{ij} = a(\phi_i, \phi_j) = a(\phi_j, \phi_i) = a_{ji}.$$

Außerdem folgt aus der Koeffizienten von a , dass mit $\mathbf{0} \neq \boldsymbol{\nu} \in \mathbb{R}^N$ gilt

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\nu}^T A \boldsymbol{\nu} &= \sum_{i,j=1}^N \nu_i a_{ij} \nu_j = \sum_{i=1}^N \nu_i \sum_{j=1}^N a(\phi_i, \phi_j) \nu_j \\ &= \sum_{i=1}^N \nu_i a\left(\phi_i, \sum_{j=1}^N \nu_j \phi_j\right) = a\left(\sum_{i=1}^N \nu_i \phi_i, \sum_{j=1}^N \nu_j \phi_j\right) \\ &= a(v_h, v_h) \geq \alpha \|v_h\|_H^2 > 0, \end{aligned}$$

da $\sum \nu_i \phi_i = v_h \neq 0$ wegen $\boldsymbol{\nu} \neq \mathbf{0}$. Damit ist A also positiv definit und es folgt nochmals, dass $A\boldsymbol{\mu} = \mathbf{f}$ eine eindeutige Lösung hat.

Um eine Basis \mathcal{B}_h bzgl. V_h beschreiben zu können, muss das Gebiet $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ in endliche Elemente zerlegt werden. Die Basis \mathcal{B}_h und damit der Raum V_h wird dann bzgl. einer Zerlegung \mathcal{T}_h beschrieben. Eine gebräuchliche Zerlegung \mathcal{T}_h kann durch Dreiecke oder auch Vierecke geschehen. Wir wollen in der vorliegenden Arbeit nur Zerlegungen durch Dreiecke betrachten, hierfür führen wir den folgenden Begriff ein (vgl. [Bra13] Seite 58 oder [Sta08] Seite 19).

Definition 2.19 (Triangulierung). Es sei $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ ein durch einen Polygonzug berandetes Gebiet. Dann heißt eine Zerlegung aus Dreiecken

$$\mathcal{T} = \{T_1, T_2, \dots, T_M\}$$

Triangulierung, wenn gilt:

- (a) Für alle Dreiecke $T \in \mathcal{T}$ gilt: T ist abgeschlossen.
- (b) Ganz Ω wird durch alle Dreiecke aus \mathcal{T} überdeckt, d.h. $\bar{\Omega} = \bigcup_{T \in \mathcal{T}} T$.
- (c) Der Schnitt zweier Dreiecke $T_i \cap T_j$ mit $i \neq j$ überlappt sich nicht, d.h. $\text{int}(T_i) \cap \text{int}(T_j) = \emptyset$.

Wir nennen eine Triangulierung *konform* oder *zulässig*, wenn zusätzlich gilt:

- (d) Für jede Kante k eines Dreiecks $T \in \mathcal{T}$ gilt entweder $k \subset \partial\Omega$ oder $k = \tilde{k}$ für eine weitere Kante \tilde{k} eines weiteren Dreiecks $\tilde{T} \in \mathcal{T}$.

Der Radius des Umkreises eines Dreieckes T wird mit h bezeichnet und beschreibt die Größe eines Dreiecks. Wenn jedes Dreieck $T \in \mathcal{T}$ höchstens einen Radius von h hat, so schreiben wir \mathcal{T}_h statt \mathcal{T} .

- Bemerkung 2.20.**
- (a) Ein Dreieck $T \in \mathcal{T}_h$ bezeichnen wir auch als (*finites*) *Element*.
 - (b) Sollte $\Omega \subset \mathbb{R}^3$ sein, so können wir analog zu Definition 2.19 eine Zerlegung mit Tetraedern definieren.

Für die Netzverfeinerung führen wir zwei unterschiedliche Familien von Zerlegungen ein (vgl. [Bra13] Seite 58).

Definition 2.21 ((quasi-) uniforme Zerlegung). Eine Familie von Zerlegungen $\{\mathcal{T}_h\}$ heißt *quasi-uniform*, wenn es eine Zahl $\kappa > 0$ gibt, so dass jedes $T \in \mathcal{T}_h$ einen Kreis vom Radius

$$\rho_T \geq \frac{h_T}{\kappa}$$

enthält, wobei h_T der Radius des Dreiecks T ist.

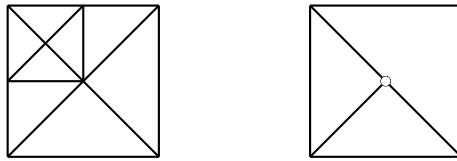


Abbildung 2.2: Zulässige und unzulässige Triangulierung (mit hängendem Knoten)

Eine Familie von Zerlegungen $\{\mathcal{T}_h\}$ heißt *uniform*, wenn es eine Zahl $\kappa > 0$ gibt, so dass jedes $T \in \mathcal{T}_h$ einen Kreis vom Radius

$$\rho_T \geq \frac{h}{\kappa}$$

enthält, wobei $h := \max_{T \in \mathcal{T}_h} h_T$ ist.

In der Abbildung 2.2 ist eine quasi-uniforme zulässige Zerlegung und eine unzulässige Zerlegung zu sehen; zweititere ist daher unzulässig, da es Kanten gibt, die weder am Rand liegen, noch mit einer Kante eines anderen Dreiecks übereinstimmen. Die Knoten, die zu diesem Phänomen führen, nennen wir *hängende Knoten*. Dies sind Knoten, die nicht Eckpunkt jedes angrenzenden Dreiecks sind.

Bemerkung 2.22. Wie man leicht sehen kann, ist jede uniforme Zerlegung auch quasi-uniform. Umgekehrt gilt dies nicht (s. Abbildung 2.2).

Allerdings lassen uniforme Zerlegungen keine lokalen Verfeinerungen zu. Da dies für adaptive Verfeinerungsstrategien allerdings ausschlaggebend ist, gehen wir im Folgenden immer von einer quasi-uniformen Zerlegung \mathcal{T}_h aus.

Nun wollen wir uns Gedanken über unseren Ansatzraum V_h machen. Hierfür gibt es, abhängig von der Konstruktion des verwendeten Elements, viele Möglichkeiten – vgl. hierzu auch [Bra13] Kapitel II, §5, Tabelle 2. Wir wollen uns weitestgehend aber nur auf ein Element konzentrieren. Zuvor betrachten wir hierfür ein wichtiges Resultat, wobei noch bemerkt sei, dass eine Funktion u auf Ω bei gegebener Zerlegung \mathcal{T}_h eine Eigenschaft stückweise hat, wenn sie auf jedem Element diese Eigenschaft besitzt.

Satz 2.23. Es sei $k \geq 1$ und $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ ein polygonales Gebiet. Eine stückweise beliebig oft differenzierbare Funktion $v : \bar{\Omega} \rightarrow \mathbb{R}$ liegt in $H^k(\Omega)$ genau dann, wenn $v \in C^{k-1}(\bar{\Omega})$ ist.

Beweis. Der Beweis ist in [Bra13] Kapitel II, §5, Satz 5.2 zu finden. \square

Der Satz 2.23 rechtfertigt, dass wir für das Modellproblem (2.6) auf einer Triangulierung \mathcal{T}_h einen Ansatzraum V_h mit stetigen Funktionen $v \in C^0(\Omega)$ verwenden, da dann auch $v \in H^1(\Omega)$ gilt. Daher wählen wir

$$V_h := \{v \in C^0(\Omega) \mid v|_T \in \mathcal{P}_m \text{ für } T \in \mathcal{T}_h, v|_{\partial\Omega} = 0\},$$

wobei \mathcal{P}_m der Raum der Polynome vom Grad m ist. Es stellt sich nun die Frage, wie wir geschickt eine Basis wählen können, um V_h aufzuspannen. Die einfachste Möglichkeit stellen *nodale Basisfunktionen* dar.

Definition 2.24 (nodale Basisfunktion). Zu einem Finiten-Element-Raum V_h und einer gegebenen Zerlegung \mathcal{T}_h sei eine Menge von Punkten P bekannt mit $|P| = N$. Die Menge $\mathcal{B}_h = \{\phi_1, \dots, \phi_N\}$ mit $\phi_i \in \mathcal{P}_m, i = 1, \dots, N$, heißt *nodale Basis* (oder *Lagrange-Basis*), wenn

$$\phi_i(x_j) = \delta_{ij} = \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases},$$

für alle $\phi_i \in \mathcal{B}_h$ und $x_j \in P$ gilt.

Mit der Menge der vorgegebenen Punkte P kann durch die Anzahl N der Grad des zur Interpolation verwendeten Polynoms gesteuert werden.

Bemerkung 2.25. Sei $m \geq 0$. In einem Dreieck T seien auf $m+1$ Linien $l = 1+2+\dots+(m+1)$ Punkte z_1, \dots, z_l angeordnet (s. Abb. 2.3). Dann gibt es zu jedem $C^0(T)$ genau ein Polynom p vom Grad m mit der Eigenschaft

$$p(z_i) = f(z_i) \quad \forall i = 1, \dots, m.$$

Beweis. Der Beweis ist in [Bra13] Kapitel II, §5, Bemerkung 5.4 zu finden. \square

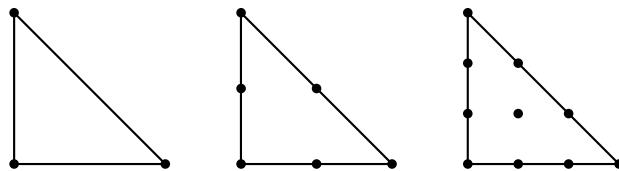


Abbildung 2.3: Dreiecke für nodale Basen (linear, quadratisch, kubisch)

Damit lässt sich für V_h mit einem beliebigen Polynomgrad m eine eindeutige nodale Basis finden, die den Raum aufspannt. Im Weiteren wollen wir lineare Ansatzfunktionen verwenden. Sofern nicht anders beschrieben bezeichnen wir im Folgenden \mathcal{S}_h mit

$$\mathcal{S}_h := \{v \in C^0(\Omega) \mid v|_T \in \mathcal{P}_1 \text{ für } T \in \mathcal{T}_h, v|_{\partial\Omega} = 0\},$$

d.h. in diesem Raum sind die Eckpunkte der Dreiecke vorgegeben bzw. später im LGS gesucht. Das Galerkin-Verfahren mit dem Ansatzraum \mathcal{S}_h wird auch Finite-Elemente-Methode (kurz: FEM) genannt.

Folgendes Beispiel soll zur Erläuterung der Berechnung von den Matrixeinträgen der Steifigkeitsmatrix A dienen.

Beispiel 2.26. Wir betrachten das Variationsproblem (2.10) auf dem Gebiet $\Omega = [-1, 1]^2$ mit \mathcal{S}_h wie oben eingeführt als den Raum der linearen Ansatzfunktionen auf einer Zerlegung \mathcal{T}_h aus 8 *Courant-Elementen*, wie in Abbildung 2.4 zu sehen ist, wobei wir auf die rechte Seite $F(v_h)$ zunächst noch nicht genauer eingehen möchten.

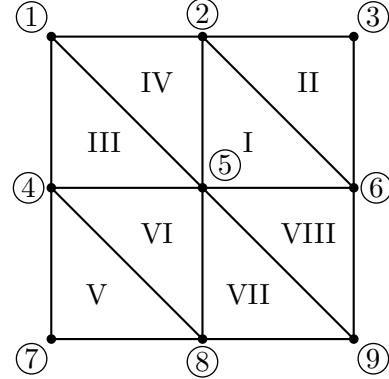


Abbildung 2.4: Triangulierung von $\Omega = [-1, 1]^2$ in 8 Courant-Elemente

Wir stellen für die nodale Basisfunktion ϕ_5 die Einträge in der Steifigkeitsmatrix A auf. Man rechnet leicht nach, dass

$$\phi_5(x, y) = \begin{cases} 1 - x - y, & \text{auf I} \\ 1 + x, & \text{auf III} \\ 1 - y, & \text{auf IV} \\ 1 + x + y, & \text{auf VI} \\ 1 + y, & \text{auf VII} \\ 1 - x, & \text{auf VIII} \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}$$

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
$\partial_x \phi_5$	-1	0	1	0	0	1	0	-1
$\partial_y \phi_5$	-1	0	0	-1	0	1	1	0

Tabelle 2.1: Ableitungen der nodalen Basisfunktion ϕ_5 .

ist und es ergeben sich die Ableitungen aus Tabelle 2.1. Dann gilt

$$\begin{aligned}
 a(\phi_5, \phi_5) &= \int_{\Omega} \nabla \phi_5 \nabla \phi_5 \, dx dy = \int_{I \cup \dots \cup VIII} \underbrace{(\partial_x \phi_5)^2}_{\geq 0} + \underbrace{(\partial_y \phi_5)^2}_{\geq 0} \, dx dy \\
 &= 2 \int_{I \cup III \cup IV} (\partial_x \phi_5)^2 + (\partial_y \phi_5)^2 \, dx dy \\
 &= 2 \left(\int_{I \cup III} \underbrace{(\partial_x \phi_5)^2}_{=1} \, dx dy + \int_{I \cup IV} \underbrace{(\partial_y \phi_5)^2}_{=1} \, dx dy \right) \\
 &= 2(\mathcal{A}(I) + \mathcal{A}(III) + \mathcal{A}(I) + \mathcal{A}(IV)) \\
 &= 8 \cdot \mathcal{A}(I) = 8 \cdot \frac{1}{2} = 4,
 \end{aligned}$$

wobei verwendet wurde, dass die Dreiecke kongruent zueinander sind und $\mathcal{A}(\cdot)$ den Flächeninhalt eines Dreiecks berechnet. Analog können wir auch die übrigen acht nodalen Basisfunktionen aufstellen und damit die Einträge der Steifigkeitsmatrix

$$\begin{aligned}
 a(\phi_5, \phi_2) &= a(\phi_5, \phi_4) = a(\phi_5, \phi_6) = a(\phi_5, \phi_8) = -1, \\
 a(\phi_5, \phi_1) &= a(\phi_5, \phi_3) = a(\phi_5, \phi_7) = a(\phi_5, \phi_9) = 0
 \end{aligned}$$

berechnen. Damit ist der Anteil der Basisfunktion ϕ_5 an der Steifigkeitsmatrix A von der Form

$$\tilde{A} = \begin{pmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Hierbei müssen die Einträge aus \tilde{A} in die Matrix $A \in \mathbb{R}^{9 \times 9}$ an die richtige Stelle zugeordnet werden, wie durch die Formel $a_{ij} = a(\phi_i, \phi_j)$ beschrieben wird. Daher nennen wir \tilde{A} *lokale Steifigkeitsmatrix* bzgl. des Knoten 5.

Dieses Vorgehen müssten wir noch für die übrigen Basisfunktionen analog durchführen, um die vollständige Steifigkeitsmatrix A zu erhalten. Dies soll hier aber nicht weiter ausgeführt werden.

Wie man sieht, ist das Vorgehen aus Beispiel 2.26 sehr aufwendig. Außerdem ist es schwer jenes auf diese Weise zu verallgemeinern, damit man es gut implementieren kann, da die Ansatzfunktionen auf das Gitter bezogen von individueller Form sind.

Um die Berechnung der Einträge der Steifigkeitsmatrix A zu verallgemeinern, betrachten wir das Referenzelement

$$\tilde{T} := \{(\xi, \eta) \in \mathbb{R}^2 \mid 0 \leq \xi \leq 1, 0 \leq \eta \leq 1 - \xi\}.$$

Auf diesem können wir dann die Integrale für die Ansatzfunktionen lokal berechnen, um dann die berechneten Werte affin auf ein beliebiges Dreieck

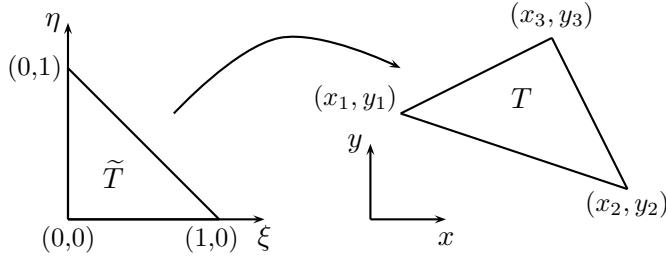


Abbildung 2.5: Referenzelement \tilde{T} für ein allgemeines Dreieck $T \in \mathcal{T}_h$

T zu transformieren (s. Abbildung 2.5). Diese auf das Element T bezogene lokale Steifigkeitsmatrix müssen wir dann durch *global-local node ordering* in die globale Steifigkeitsmatrix A assemblieren. Die genaue Berechnungsvorschrift für das oben beschriebene Vorgehen wird in Kapitel 5 noch mal genauer hergeleitet.

2.3.1 A priori Fehlerabschätzung

Wir wollen nun zeigen, dass durch Netzverfeinerung, d.h. Verkleinern von h , der Fehler zwischen der exakten Lösung u und der Galerkin-Approximation u_h kleiner wird.

Lemma 2.27. Durch $\|\cdot\|_E : H_0^1(\Omega) \rightarrow \mathbb{R}, \|v\|_E := (a(v, v))^{\frac{1}{2}}$ mit einer stetigen koerziven Bilinearform a wird eine Norm auf $H_0^1(\Omega)$ definiert.

Beweis. Aus der Stetigkeit und Koerzivität von a folgt direkt

$$\alpha \|v\|_1^2 \leq \underbrace{a(v, v)}_{=\|v\|_E^2} \leq c \|v\|_1^2. \quad (2.12)$$

Damit ist $\|\cdot\|_E$ nach oben und unten durch die Norm auf $H_0^1(\Omega)$ beschränkt und somit eine zu dieser äquivalente Norm. \square

Bemerkung. (a) Die Norm $\|\cdot\|_E$ bezeichnen wir als *Energie-Norm*. Sie gibt für die von uns später in der Strukturmechanik betrachtete Bilinearform die Verzerrungsenergie eines Kontinuums an.

(b) Für die Bilinearform

$$a(u, v) = \int_{\Omega} \nabla u \nabla v \, dx$$

mit $u, v \in H_0^1(\Omega)$ gilt dann $\|\cdot\|_E = |\cdot|_1$ (s. Bemerkung A.6).

(c) Auf $H^1(\Omega)$ wäre $\|\cdot\|_E$ also nur eine Halbnorm, da konstante Funktionen $v = c$ auch die Norm $\|v\|_E = 0$ hätten.

Satz 2.28. Die Galerkin-Approximation u_h ist die beste Approximation von u bzgl. der Energie-Norm, also

$$\|u - u_h\|_E = \inf_{v \in V_h} \|u - v\|_E.$$

Beweis. Zunächst betrachten wir die exakte und approximierte Variationsgleichung (2.9) und (2.10), d.h. finde $u \in H$ und $u_h \in V_h$, so dass

$$a(u, v) = F(v) \quad \forall v \in H, \tag{2.13}$$

$$a(u_h, v_h) = F(v_h) \quad \forall v_h \in V_h. \tag{2.14}$$

Da $V_h \subset H$ ist, gilt (2.13) auch für alle $v_h \in V_h$. Ersetzen wir dies in (2.13) und subtrahieren (2.13) und (2.14) voneinander, so erhalten wir

$$a(u - u_h, v_h) = 0 \quad \forall v_h \in V_h. \tag{2.15}$$

Damit rechnen wir für ein beliebiges $v \in V_h$ einfach nach:

$$\begin{aligned} \|u - u_h\|_E^2 &= a(u - u_h, u - u_h) \\ &= a(u - u_h, u - v + v - u_h) \\ &= a(u - u_h, u - v) + a(u - u_h, \underbrace{v - u_h}_{\in V_h}) \\ &\quad \underbrace{= 0 \text{ wegen (2.14)}}_{=} \\ &= a(u - u_h, u - v) \\ &\stackrel{\text{C.S.}}{\leq} \|u - u_h\|_E \|u - v\|_E \end{aligned}$$

und damit folgt nach Division $\|u - u_h\|_E \leq \|u - v\|_E$, was zu zeigen war. \square

Bemerkung. Die Gleichung (2.15) drückt aus, dass die Verbindung $u - u_h$ orthogonal zum Raum V_h steht und wird daher auch *Galerkin-Orthogonalität* genannt. Diese wird bei Hindernisproblemen im Allgemeinen nicht mehr erfüllt, daher führen Hindernisprobleme nicht mehr auf Variationsgleichungen, wie wir später sehen werden.

Satz 2.29 (Céa). Der Fehler der Galerkin-Approximation u_h zur exakten Lösung u hat in der H^1 -Norm die Eigenschaft

$$\|u - u_h\|_1 \leq \tilde{c} \inf_{v \in V_h} \|u - v\|_1.$$

Beweis. Aus (2.12) und Satz 2.28 folgt

$$\|u - u_h\|_1 \leq \left(\frac{1}{\alpha}\right)^{\frac{1}{2}} \|u - u_h\|_E \leq \left(\frac{1}{\alpha}\right)^{\frac{1}{2}} \|u - v\|_E \leq \left(\frac{c}{\alpha}\right)^{\frac{1}{2}} \|u - v\|_1.$$

Damit folgt die Behauptung mit $\tilde{c} := \sqrt{\frac{c}{\alpha}}$. \square

Nun kommen wir zum zentralen Satz dieses Unterkapitels, mit dem man direkt eine a priori Fehlerschätzung folgern kann. Vergleiche hierzu auch [Bra13] Kapitel II, §6, Satz 6.4.

Theorem 2.30 (Approximationssatz für Interpolationen). *Es sei $k \geq 2$ und \mathcal{T}_h eine quasi-uniforme Triangulierung von Ω . Dann gilt für die Interpolation I_h auf die stetigen, stückweise durch Polynome vom Grad $k-1$ gegebenen Funktionen mit einer von Ω, κ und k abhängigen Konstanten c die a priori Fehlerabschätzung*

$$\|u - I_h u\|_m \leq ch^{k-m} |u|_k$$

für $u \in H^k(\Omega)$ und $0 \leq m \leq k$.

Beweis. Für den Beweis würden wir noch weitere Ausführungen über affine Transformationen benötigen, die wir hier nicht weiter aufführen wollen. Der komplette Beweis ist in [Bra13] auf Seite 75ff einzusehen. \square

Für $k = 2$, d.h. lineare Polynome, und $m = 1$ (die Norm in H^1) gilt dann

$$\|u - I_h u\|_1 \leq ch|u|_2 \tag{2.16}$$

für $u \in H^2(\Omega)$.

Korollar 2.31. *Für lineare C^0 -Elemente gilt für die Galerkin-Approximation u_h die a priori Fehlerschätzung für unser Modellproblem (DP)*

$$\|u - u_h\|_1 \leq \tilde{c}h|u|_2.$$

Beweis. Mit Theorem 2.30 und Satz 2.29 folgt

$$\begin{aligned} \|u - u_h\|_1 &\leq \left(\frac{c_1}{\alpha}\right)^{\frac{1}{2}} \inf_{v \in V_h} \|u - v\|_1 \leq \left(\frac{c_1}{\alpha}\right)^{\frac{1}{2}} \|u - I_h u\|_1 \\ &\stackrel{(2.16)}{\leq} \left(\frac{c_1}{\alpha}\right)^{\frac{1}{2}} c_2 h|u|_2. \end{aligned}$$

Mit $u \in H^2(\Omega)$ und $\tilde{c} := \left(\frac{c_1}{\alpha}\right)^{\frac{1}{2}} c_2$ folgt dann die Behauptung. \square

Mit Korollar 2.31 gilt also, dass für $h \rightarrow 0$ die Galerkin-Approximation u_h gegen die exakte Lösung u konvergiert. Es ist also sinnvoll das Netz zu verfeinern, allerdings bringt jede Verfeinerung auch mehr Knoten und damit ein größeres Gleichungssystem mit sich. Daher stellt sich die Frage, ob es sinnvoll ist, nur einzelne Teile des Gitters zu verfeinern, womit wir uns im Kapitel 2.4 beschäftigen wollen.

2.4 Adaptive Verfeinerungsstrategien

Wir wollen nun betrachten, wie sich das Gitter geschickt verfeinern lässt, so dass die Anzahl der Knoten im Vergleich zur Verringerung des Fehlers hinreichend groß ist. Diese Verfeinerung im n -ten Schritt geschieht adaptiv in Abhängigkeit des aktuellen Gitters \mathcal{T}_{h_n} bzw. der aktuellen Lösung u_{h_n} . Hierbei wird *a posteriori* der Fehler im nächsten Schritt $\|u - u_{h_{n+1}}\|$ mit dem Fehler im aktuellen $\|u - u_{h_n}\|$ verglichen und daraus die notwendige Größe der Verfeinerung abgeschätzt. Da die Lösung u für ein Problem, wie schon beschrieben, nicht bekannt oder berechenbar sein muss, gilt es den oben beschriebenen Fehler zu schätzen. Für solche *a posteriori* Fehlerschätzer gibt es mehrere Ansätze.

2.4.1 A posteriori Fehlerschätzer

Wie auch in [Bra13] Kapitel III, §8, Seite 176 genauer beschrieben, gibt es verschiedene Arten von *a posteriori* Fehlerschätzern:

- (a) Residuale Schätzer
- (b) Schätzung über ein lokales Neumann-Problem
- (c) Schätzung über ein lokales Dirichlet-Problem
- (d) Schätzung durch Mitteilung
- (e) Hierarchische Schätzer

Als Fehlerschätzer für Hindernis- oder auch Kontaktprobleme sind häufig residuale Schätzer zu finden. Wir wollen uns in dieser Arbeit mit hierarchischen Fehlerschätzern beschäftigen.

Die Idee dabei ist, dass wir den Fehler durch eine genauere Lösung aus einem „besseren“ Ansatzraum abschätzen, in dem Sinne, dass für den Ansatzraum V_h , in dem die berechnete Lösung u_h liegt, gilt:

$$V_h \subset W_h \text{ mit } W_h = V_h \oplus Z_h, \quad (2.17)$$

wobei bzgl. der Obermenge W_h die Lösung u_h^W genauer ist als u_h , d.h. die *Saturationseigenschaft*

$$a(u - u_h^W, u - u_h^W) \leq \beta^2 a(u - u_h, u - u_h) \quad (2.18)$$

mit einer Konstanten $0 \leq \beta < 1$ erfüllt.

Bemerkung 2.32. Da wir zur Berechnung der Galerkin-Approximation den Raum $V_h = \mathcal{S}_h$ der linearen Ansatzfunktionen verwenden werden, wählen wir später als Hierarchie

$$W_h = \mathcal{Q}_h := \{v \in C^0(\Omega) \mid v|_T \in \mathcal{P}_2 \text{ für } T \in \mathcal{T}_h, v|_{\partial\Omega} = 0\},$$

2. Grundlagen

den Raum der quadratischen Ansatzfunktionen. Daraus lässt sich dann der Raum Z_h ableiten.

Wir wollen nun aber nicht die bessere Approximation $u_h^W \in W_h$ exakt berechnen, da dies ein zu großer Aufwand wäre, sondern schränken das so genannte *Defektproblem* lokal auf die Erweiterung Z_h ein, d.h.

$$a(u_h^W, z_h) = F(z_h) \quad \forall z_h \in Z_h, \quad (2.19)$$

wobei in (2.19) u_h^W aufgeteilt werden kann, da W_h aus direkter Summe von V_h, Z_h entsteht, d.h. $u_h^W = u_h + e_h$ mit $u_h \in V_h, e_h \in Z_h$. Da die Lösung u_h in jedem Schritt bekannt ist, lässt sich das lokale Defektproblem (2.19) schreiben als

$$e_h \in Z_h : \quad a(e_h, z_h) = \underbrace{F(z_h) - a(u_h, z_h)}_{= \tilde{F}(z_h)} \quad \forall z_h \in Z_h. \quad (2.20)$$

Man kann zeigen, dass für die Lösung e_h aus (2.20) unter der Bedingung (2.18) der Term $a(e_h, e_h)$ beschränkt ist und daher gibt der auf ein Dreieck T bezogene lokale Anteil $\eta_T := a_T(e_h, e_h)^{\frac{1}{2}}$ den hierarchischen Fehlerschätzer an.

Damit lässt sich $a(e_h, e_h)$ in die lokalen Anteile η_T aufteilen, so dass

$$a(e_h, e_h) = \sum_{T \in \mathcal{T}_h} a_T(e_h, e_h).$$

Daher verwenden wir als adaptive Strategie: Verfeinere alle Dreiecke $T \in \mathcal{T}_h$, deren lokaler Fehleranteil größer gleich dem skalierten Gesamtfehler ist, also

$$\eta_T \geq \sigma \left(\sum_{T \in \mathcal{T}_h} \eta_T^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

wobei $\sigma \in (0, 1)$ ist. Wählen wir σ sehr klein, so werden viele Dreiecke verfeinert, da auch kleinere lokale Fehleranteile die Ungleichung erfüllen. Umgekehrt gilt für ein großes σ , dass man viele Adaptionsschritte benötigt, um einen hinreichend kleinen Fehler zu erhalten, da nur wenige Dreiecke pro Verfeinerungsschritt ausgewählt werden.

Wie die Hierarchie bzgl. der Räume geschickt gewählt werden kann, wollen wir in Kapitel 4 genauer beschreiben und auf Variationsprobleme unter Nebenbedingung anwenden, um einen a posteriori Schätzer herzuleiten.

2.4.2 Verfeinerung des Netzes

Auf der Grundlage des a posteriori Schätzers müssen die ausgewählten Dreiecke verfeinert werden. Dabei ist es essentiell, dass eine konforme Triangulierung auch konform bleibt, was durch Verwendung verschiedenener Verfeinerungsmethoden möglich ist (s. Abbildung 2.6).

2. Grundlagen

- (i) *Rote* (reguläre) Verfeinerung,
- (ii) *Grüne* Verfeinerung,
- (iii) *Bläue* Verfeinerung.

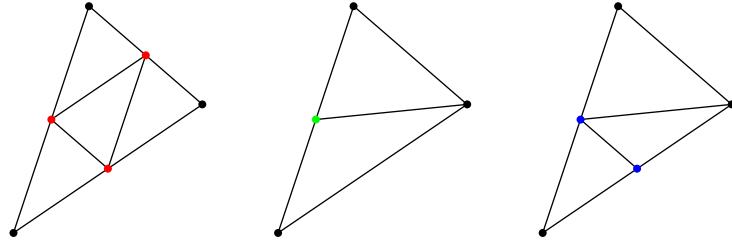


Abbildung 2.6: Verfeinerungen von Dreiecken

Bei der regulären Verfeinerung werden die drei Mittelpunkte der Kanten eines Dreiecks miteinander verbunden. Der Vorteil dabei ist, dass die Winkel der entstandenen Dreiecke identisch zu den vorherigen Winkeln sind. Damit bleibt das Verhältnis zwischen dem Radius des Um- zum Innenkreises $\frac{h_T}{\rho_T}$, was den Parameter für die Quasi-Uniformität angibt, gleich.

Beim regulären Verfeinern können allerdings in anliegenden Dreiecken, die bzgl. des a posteriori Fehlerschätzers nicht verfeinert werden müssen, hängende Knoten (vgl. Abbildung 2.2) entstehen, wodurch eine nichtzulässige Triangulierung entstehen würde. Um die hängenden Knoten zu eliminieren, kann die Verfeinerungsmethode (ii) und (iii) verwendet werden.

Bei der grünen Verfeinerung wird der Mittelpunkt genau einer Kante mit dem gegenüberliegendem Eckpunkt verbunden.

Bei der blauen Verfeinerung verbindet man den Mittelpunkt der längsten Kante im Dreieck mit dem gegenüberliegenden Eckpunkt und einem weiteren Mittelpunkt einer anderen Kante.

Matlab verwendet diese Verfeinerungsstrategien in der Methode *refinemesh*. Diese Methode werden wir bei der Implementierung der numerischen Beispiele auch verwenden und daher wollen wir das Vorgehen von Matlab kurz vorstellen. Ist $\widetilde{\mathcal{T}}_h$ die Menge der zu verfeinernden Dreiecke, dann werden folgende Schritte durchgeführt:

- (i) Halbiere alle Kanten der ausgewählten Dreiecke $T \in \widetilde{\mathcal{T}}_h$.
- (ii) Halbiere jeweils die längste Kante aller Dreiecke, die schon eine geteilte Kante haben.
- (iii) Bilde die neuen Dreiecke nach folgender Strategie:
 - (a) Wenn alle drei Kanten eines Dreiecks geteilt sind, verwende die reguläre (rote) Verfeinerung.

- (b) Sind genau zwei Seiten halbiert, so verwende die blaue Verfeinerung.
- (c) Ist genau eine Kante eines Dreiecks halbiert, dann benutze die grüne Verfeinerung.

2.5 Einführung in die Strukturmechanik

Um in Kapitel 3.2 Kontaktprobleme bzgl. der Mechanik beschreiben zu können, wollen wir in diesem Kapitel kurz die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Konzepte der Kontinuumsmechanik einführen.

Definition 2.33 (Kontinuum). Ein *Kontinuum* ist eine Teilmenge $\mathcal{B} \subset \mathbb{R}^3$, dessen Punkte stetig verteilt sind. Den Punkten werden gewisse Materialeigenschaften zugewiesen.

Notation. Wir wollen Vektoren oder vektorwertige (bzw. tensorwertige) Funktionen durch fettgedruckte Buchstaben darstellen (s. auch Anhang C).

2.5.1 Kinematik

Um die Kinematik für ein Kontinuum zu beschreiben, betrachten wir dieses in zeitlich voneinander abhängigen Zuständen. Dabei unterscheiden wir zwischen den *materiellen Punkten* des Kontinuums, die mit $\mathbf{X} = (X_1, X_2, X_3)$ beschrieben werden, und den *räumlichen Punkten* $\mathbf{x} = (x_1, x_2, x_3)$.

Definition 2.34 (Konfiguration). Eine zu jedem Zeitpunkt t differenzierbare und stetige Zuordnung $\mathbf{x} = \varphi(\mathbf{X}, t)$ nennen wir *Konfiguration*. Die Konfiguration zum Zeitpunkt $t = t_0$ nennen wir *Ausgangs- oder Referenzkonfiguration*, die Konfiguration zum aktuellen Zeitpunkt t *aktuelle Konfiguration* oder *Momentankonfiguration*.

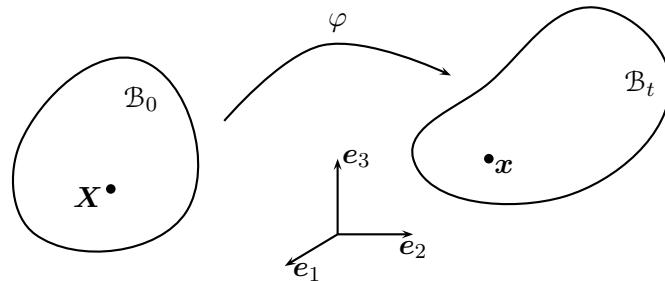


Abbildung 2.7: Konfiguration eines Kontinuums \mathcal{B}

Bemerkung 2.35. Wir können der Einfachheit halber zu einem Startzeitpunkt $t = t_0$ die materiellen Punkte durch die räumlichen Koordinaten der Ausgangskonfiguration $\mathbf{X} = \mathbf{x}(t_0)$ beschreiben. So liegt der Körper \mathcal{B} aus Abbildung 2.7 im selben Koordinatensystem wie die aktuelle Konfiguration \mathcal{B}_t des Körpers.

Damit ist die Bewegung (oder auch Deformation) eines Kontinuums als zeitlich stetige Folge von Konfigurationen $\mathbf{x} = \mathbf{x}(\mathbf{X}, t)$ zu verstehen. Hierfür gibt es zwei grundlegende Betrachtungsweisen, die *Lagrange'sche* und die *Euler'sche Betrachtungsweise*. Bei der Lagrange'schen Betrachtung ist der Beobachter mit dem materiellen Punkt \mathbf{X} verbunden und misst alle Änderungen des Kontinuums an diesem Punkt; jene wird auch *materielle Betrachtungsweise* genannt. Bei der Euler'schen Betrachtungsweise befindet sich der Beobachter am räumlichen Punkt \mathbf{x} und misst zu jedem Zeitpunkt t die Änderungen am Punkt \mathbf{x} , die sich durch das Passieren von Teilchen \mathbf{X} ergeben; jene wird auch *räumliche Betrachtungsweise* genannt.

Um die Deformation eines Körpers \mathcal{B} nun beschreiben zu können, betrachten wir die Veränderung von Linienelementen $d\mathbf{x}$ bzgl. der Ausgangs- und Momentankonfiguration. Wir beschreiben den sogenannten *Deformationsgradienten* \mathbf{F} durch den Faktor, der zwischen der Deformation dieser Linienelemente liegt, d.h.

$$d\mathbf{x} = \mathbf{F} d\mathbf{X} . \quad (2.21)$$

Damit ergibt sich der Deformationsgradient als

$$\mathbf{F} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{X}} = \text{Grad } \mathbf{x} , \quad (2.22)$$

dies ist der Gradient bzgl. der materiellen Betrachtung und wird daher auch *materieller Deformationsgradient* genannt. Analog können wir den *räumlichen Deformationsgradienten* erhalten als

$$\mathbf{F}^{-1} = \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{x}} = \text{grad } \mathbf{X} . \quad (2.23)$$

Die Deformationsgradienten sind zweistufige Tensoren, die sich jeweils auf die Referenz- und Momentankonfiguration bzgl. der Basen beziehen.

Damit können wir nun die Verzerrung eines Kontinuums mittels des Deformationsgradienten ausdrücken. Um jene zu beschreiben, betrachten wir die Längenänderung zwischen den Linienelementen $d\mathbf{X}$ und $d\mathbf{x}$.

$$\begin{aligned} \|d\mathbf{x}\|^2 - \|d\mathbf{X}\|^2 &= (d\mathbf{x})^T d\mathbf{x} - (d\mathbf{X})^T d\mathbf{X} \\ &\stackrel{(2.21)}{=} (d\mathbf{X})^T \mathbf{F}^T \mathbf{F} d\mathbf{X} - (d\mathbf{X})^T d\mathbf{X} \\ &= (d\mathbf{X})^T (\mathbf{F}^T \mathbf{F} - \mathbf{1}) d\mathbf{X} , \end{aligned}$$

wobei $\mathbf{1}$ den zweistufigen Einheitstensor beschreibt. Also lässt sich die Verzerrung bzgl. der Ausgangskonfiguration durch den *Green-Lagrange'schen Verzerrungstensor*

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2}(\mathbf{C} - \mathbf{1}) \quad (2.24)$$

mit dem *rechten Cauchy-Green-Tensor* $\mathbf{C} = \mathbf{F}^T \mathbf{F}$ beschreiben.

Bemerkung 2.36. Dies ist natürlich nur eine Möglichkeit. Wichtig für die Wahl eines Verzerrungsmaßes ist jedoch, dass für eine reine Translation oder Rotation dieses Null wird.

Daher ist beispielsweise $\mathbf{F} - \mathbf{1}$ als Verzerrungsmaß unbrauchbar. Der Deformationsgradient lässt sich in Rotation \mathbf{R} und Streckung \mathbf{U} durch

$$\mathbf{F} = \mathbf{R} \cdot \mathbf{U}$$

aufteilen. Sollten wir nun eine reine Rotation betrachten, so ist $\mathbf{U} = \mathbf{1}$ und damit $\mathbf{F} = \mathbf{R}$, was nicht zwangsläufig der Einheitstensor sein muss.

Wenn wir einen Punkt bzgl. seiner Ausgangs- und Momentankonfiguration vergleichen, so erhalten wir die *Verschiebung*

$$\mathbf{u}(\mathbf{X}, t) = \mathbf{x}(\mathbf{X}, t) - \mathbf{X}. \quad (2.25)$$

Es ergibt sich analog zum materiellen und räumlichen Deformationsgradienten (2.22) und (2.23) mit (2.25) der materielle und räumliche *Verschiebungsgradient*:

$$\begin{aligned} \mathbf{H} &= \text{Grad } \mathbf{u} = \frac{\partial(\mathbf{x} - \mathbf{X})}{\partial \mathbf{X}} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{X}} - \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{X}} = \mathbf{F} - \mathbf{1}, \\ \mathbf{h} &= \text{grad } \mathbf{u} = \frac{\partial(\mathbf{x} - \mathbf{X})}{\partial \mathbf{x}} = \frac{\partial \mathbf{x}}{\partial \mathbf{x}} - \frac{\partial \mathbf{X}}{\partial \mathbf{x}} = \mathbf{1} - \mathbf{F}^{-1}. \end{aligned}$$

Damit ergibt sich beispielsweise für den Green-Lagrange'schen Verzerrungstensor (2.24) bzgl. des materiellen Verschiebungsgradienten die Beziehung

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \frac{1}{2}(\mathbf{C} - \mathbf{1}) = \frac{1}{2}(\mathbf{F}^T \mathbf{F} - \mathbf{1}) = \frac{1}{2}((\mathbf{1} + \mathbf{H})^T (\mathbf{1} + \mathbf{H}) - \mathbf{1}) \\ &= \frac{1}{2}(\mathbf{1} + \mathbf{H}^T + \mathbf{H} + \mathbf{H}^T \mathbf{H} - \mathbf{1}) = \frac{1}{2}(\mathbf{H}^T + \mathbf{H} + \mathbf{H}^T \mathbf{H}). \end{aligned} \quad (2.26)$$

Wenn wir von kleinen Deformationen ausgehen, so ist es sinnvoll für die spätere numerische Berechnung die nichtlinearen Verzerrungsgrößen (wie in (2.26)) zu linearisieren. Dies können wir mithilfe von Taylor und der Gâteaux-Ableitung (A.1) bestimmen. Für eine vektor- oder tensorwertige Funktion \mathbf{A} gilt dann

$$\text{lin}(\mathbf{A})_{\mathbf{x}, \mathbf{u}} = \mathbf{A}(\mathbf{x}) + \left. \frac{d}{d\varepsilon} (\mathbf{A}(\mathbf{x} + \varepsilon \mathbf{u})) \right|_{\varepsilon=0}. \quad (2.27)$$

2. Grundlagen

Wenden wir also (2.27) auf den Green-Lagrange'schen Verzerrungstensor (2.26) an, so erhalten wir die Linearisierung:

$$\begin{aligned}
\text{lin}(\mathbf{E})_{\mathbf{X}, \mathbf{u}} &= \underbrace{\mathbf{E}(\mathbf{X})}_{=0} + \frac{d}{d\varepsilon}(\mathbf{E}(\mathbf{X} + \varepsilon\mathbf{u})) \Big|_{\varepsilon=0} \\
&= \frac{1}{2} \frac{d}{d\varepsilon} \left(\left(\frac{\partial(\mathbf{X} + \varepsilon\mathbf{u})}{\partial\mathbf{X}} \right)^T \frac{\partial(\mathbf{X} + \varepsilon\mathbf{u})}{\partial\mathbf{X}} - \mathbf{1} \right) \Big|_{\varepsilon=0} \\
&= \frac{1}{2} \frac{d}{d\varepsilon} ((\mathbf{1} + \varepsilon\mathbf{H})^T (\mathbf{1} + \varepsilon\mathbf{H}) - \mathbf{1}) \Big|_{\varepsilon=0} \\
&= \frac{1}{2} \frac{d}{d\varepsilon} (\mathbf{1} + \varepsilon\mathbf{H}^T + \varepsilon\mathbf{H} + \varepsilon^2\mathbf{H}^T\mathbf{H} - \mathbf{1}) \Big|_{\varepsilon=0} \\
&= \frac{1}{2} (\mathbf{H}^T + \mathbf{H} + 2\varepsilon\mathbf{H}^T\mathbf{H}) \Big|_{\varepsilon=0} = \frac{1}{2} (\mathbf{H}^T + \mathbf{H}) =: \boldsymbol{\varepsilon}.
\end{aligned}$$

Wir wollen der Einfachheit halber in dieser Arbeit von kleinen Deformationen ausgehen. Dann gilt $\mathbf{H} \approx \mathbf{h} = \nabla\mathbf{u}$, somit werden wir im Weiteren den linearisierten Verzerrungstensor

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2}(\nabla^T\mathbf{u} + \nabla\mathbf{u}) \quad (2.28)$$

verwenden.

2.5.2 Kinetik

Da wir von kleinen Deformationen ausgehen, betrachten wir den *Cauchy-Spannungstensor* $\boldsymbol{\sigma}$, der die aktuelle Kraft bzgl. der Querschnittsfläche in der Momentankonfiguration setzt. Wie in [Wri06] Kapitel 3.2.2 beschrieben, gilt das *Cauchy-Theorem*, das besagt, dass die Spannung \mathbf{t} auf einer Schnittfläche eines beliebigen Schnittes im Körper \mathcal{B} gleich der Spannung $\boldsymbol{\sigma}$ in Normalenrichtung \mathbf{n} ist, d.h.

$$\mathbf{t} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}. \quad (2.29)$$

Mit den Bilanzgleichungen für das Momentengleichgewicht kann man herleiten, dass der Cauchy-Spannungstensor symmetrisch ist, also $\boldsymbol{\sigma}^T = \boldsymbol{\sigma}$ gilt.

Betrachten wir nun eine Volumenkraft $\bar{\mathbf{b}}$ und eine Oberflächenlast $\bar{\mathbf{t}}$, die auf den Körper \mathcal{B} wirken, so erhalten wir das (*globale*) Kräftegleichgewicht

$$\int_{\Omega} \bar{\mathbf{b}} dv + \int_{\partial\Omega} \bar{\mathbf{t}} da = \mathbf{0}, \quad (2.30)$$

wobei $\Omega \subset \mathcal{B} \subset \mathbb{R}^3$ eine Teilmenge des Kontinuums \mathcal{B} beschreibt. Mit dem Cauchy-Theorem (2.29) und dem Satz von Gauß lässt sich (2.30) als Integral über Ω schreiben durch

$$\int_{\Omega} \bar{\mathbf{b}} + \operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} dv = \mathbf{0}. \quad (2.31)$$

Die Gleichung (2.31) muss nach dem Schnittprinzip auf jeder Teilmenge Ω gelten, was nur erfüllt werden kann, wenn der Integrand Null ist. Damit erhalten wir die sogenannte *starke* oder auch *lokale* Form des Gleichgewichts

$$\operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} + \bar{\boldsymbol{b}} = \mathbf{0} \text{ auf } \Omega. \quad (2.32)$$

Wir wollen in dieser Arbeit von einem konstanten Wärmefeld ausgehen, sodass wir thermodynamische Prozesse vernachlässigen können.

2.5.3 Konstitutive Gleichungen und Prinzipien

Auch für die konstitutiven Gleichungen (Materialannahmen etc.) machen wir uns zu Nutze, dass wir von kleinen Deformationen ausgehen. Wir gehen daher von einem linear elastischen Material aus, d.h. dass Spannung und Verzerrung in einem linearen Zusammenhang stehen. Hierfür werden wir in der Arbeit das *Hooke'sche Materialmodell* verwenden:

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathcal{C} : \boldsymbol{\varepsilon} = 2\mu\boldsymbol{\varepsilon} + \lambda(\operatorname{tr} \boldsymbol{\varepsilon})\mathbf{I}, \quad (2.33)$$

wobei λ, μ die *Lamé-Konstanten* darstellen. Dabei handelt es sich um materialabhängige Parameter, die im Zusammenhang mit dem Elastizitätsmodul E und der Querkontraktionszahl ν stehen.

$$\lambda = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)}, \quad \mu = \frac{E}{2(1+\nu)}.$$

Der Materialtensor \mathcal{C} ist 4-stufig und mit „:“ ist das doppelt verjüngende Skalarprodukt (s. Definition C.8) gemeint. Es sei bemerkt, dass ν gleich dem Schubmodul G ist.

Da wir in dieser Arbeit immer $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ annehmen wollen, wollen wir an dieser Stelle noch zwei Prinzipien zur Behandlung von dreidimensionalen strukturmechanischen Problemen im \mathbb{R}^2 vorstellen (vgl. [Wri09] Kapitel 5.4.1 und 5.4.2).

Ist beispielsweise die dritte Richtung dünn gegenüber den anderen zwei, so können wir das Prinzip des *ebenen Spannungszustand* verwenden. Hierbei ist die Spannung in der dritten Richtung $\sigma_{33} = 0$. Dies impliziert jedoch nicht, dass es in dieser Richtung keine Verzerrung geben muss. Aus dem Hooke'schen Materialgesetz (2.33) errechnen wir nämlich, dass die Verzerrung ε_{33} abhängig von ε_{11} und ε_{22} ist.

$$\varepsilon_{33} = -\frac{\nu}{1-\nu}(\varepsilon_{11} + \varepsilon_{22})$$

Damit lässt sich der Materialtensor \mathcal{C} als Matrix schreiben, wenn wir die *Voigt-Notation* bzgl. des Spannungs- und Verzerrungstensors verwenden.

Analog erhalten wir den *ebenen Verzerrungszustand*, indem wir die Verzerrung in die dritte Richtung $\varepsilon_{33} = 0$ setzen. Anschaulich heißt das, dass

2. Grundlagen

die dritte Richtung unendlich ausgedehnt ist. Auch hier ergeben sich durch Einsetzen von $\varepsilon_{33} = 0$ in (2.33) Abhängigkeiten zwischen den Spannungen:

$$\sigma_{33} = \nu(\sigma_{11} + \sigma_{22}),$$

was einerseits bedeutet, dass die Spannung in der dritten Richtung nicht zwangsläufig Null sein muss und andererseits uns wieder Einträge aus dem Materialtensor \mathcal{C} eliminieren lässt.

Kapitel 3

Variationsungleichungen

Hindernis- und Kontaktprobleme basieren auf der Minimierung von Energiefunktionalen, wie dies im Theorem von Lax-Milgram (Theorem 2.12) auch schon verwendet wurde. Allerdings minimieren wir diese jetzt nur auf einer Teilmenge der Funktionen aus dem betrachteten Hilbertraum, d.h. wir werden eine Nebenbedingung einführen. Wir wollen in diesem Kapitel die theoretische Grundlage für die Lösung solcher Probleme bilden und eine a priori Fehlerschätzung zwischen exakter und mit der Finiten-Elemente-Methode approximierter Lösung durchführen.

Dieses Kapitel basiert auf [KO88], [Sta11], [Ste12b], [Ste12a], [Wri01], [Wri06], [HHNL80], [Glo08], [Fal74].

3.1 Ein Hindernisproblem

Als Modellproblem wollen wir wieder die Auslenkung $u : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ einer in Ω eingespannten Membran betrachten, die mit der Flächenlast f belastet wird (vgl. auch Abbildung 2.1). Nun wollen wir jedoch die Auslenkung u durch ein Hindernis ψ in Ω behindern (s. Abbildung 3.1 – die Auslenkung u der Membran liegt bzgl. der angedeuteten Kurve in der Skizze rotationssymmetrisch zur z -Achse). Dies führt auf die Minimierung des quadratischen Energiefunktionalen

$$\min_{v \in K} J(v) = \frac{1}{2}a(v, v) - (f, v) \quad (3.1)$$

mit $K := \{v \in H_0^1(\Omega) \mid v \geq \psi \text{ fast überall in } \Omega\}$, wobei $a(\cdot, \cdot), (f, \cdot)$ wie in Kapitel 2.2 definiert sind. Das Funktional J gibt dabei wie zuvor die in der Membran gespeicherte Energie an.

Der Unterschied zur Minimierung von J aus dem Theorem von Lax-Milgram liegt nun also darin, dass wir J nicht über ganz $H_0^1(\Omega)$ minimieren, sondern nur über eine Teilmenge $K \subset H_0^1(\Omega)$ (anschaulich alle Auslenkungen u , die oberhalb des Hindernisses ψ liegen).

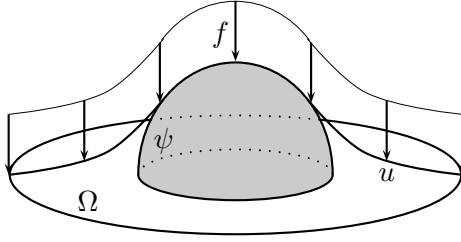


Abbildung 3.1: Ein Hindernisproblem mit Hindernis ψ , konstanter Streckenlast f und Lösung u

Wir können nun analog zum Kapitel 2.2 auch für diese Art von Problemen eine Variationsformulierung herleiten.

3.1.1 Variationsformulierung für das Hindernisproblem

Um für das Hindernisproblem (3.1) eine äquivalente Variationsformulierung zu erhalten, wollen wir die in Anhang A.2 aufgeführten Optimalitätskriterien verwenden. Hierfür müssen wir zunächst zeigen, dass die oben aufgeführte Menge K konvex und abgeschlossen in $H_0^1(\Omega)$ ist.

Lemma 3.1. *Die Menge $K = \{v \in H_0^1(\Omega) \mid v \geq \psi \text{ fast überall in } \Omega\}$ ist eine konvexe abgeschlossene Teilmenge von $H_0^1(\Omega)$.*

Beweis. (i) Es seien $u, v \in K$, d.h. $u \geq \psi$ und $v \geq \psi$ fast überall in Ω . Dann gilt für $t \in [0, 1]$

$$(1-t)u + tv \geq (1-t)\psi + t\psi = \psi,$$

somit ist $(1-t)u + tv \in K$, also K konvex.

(ii) Es sei $(v_n)_{n \in \mathbb{N}} \subset K$ eine konvergente Folge mit $v_n \rightarrow v$ für $n \rightarrow \infty$. Da $H_0^1(\Omega)$ laut Bemerkung A.8 ein abgeschlossener Unterraum von $H^1(\Omega)$ ist, folgt direkt $v \in H_0^1(\Omega)$. Da weiter $v_n \geq \psi$ für alle $n \in \mathbb{N}$ gilt, folgt aus dem Spursatz (vgl. [Bra13] Kapitel II, §3, Satz 3.1), dass auch $v \geq \psi$ fast überall in Ω gilt und damit ist $v \in K$, d.h. K ist abgeschlossen. \square

Satz 3.2. *Es sei $K = \{v \in H_0^1(\Omega) \mid v \geq \psi \text{ fast überall in } \Omega\}$. Das Minimierungsproblem*

$$\min_{v \in K} J(v) = \frac{1}{2}a(v, v) - (f, v) \tag{3.2}$$

ist äquivalent zur Variationsungleichung: Finde $u \in K$, so dass

$$a(u, v - u) \geq (f, v - u) \quad \forall v \in K. \tag{3.3}$$

3. Variationsungleichungen

Beweis. Aus Lemma 2.10 folgt, dass J konvex ist und damit gilt mit Satz A.11, dass $u \in K$ genau dann eine Lösung von (3.2) ist, wenn

$$\mathcal{D}_{v-u}J(u) \geq 0 \quad \forall v \in K \quad (3.4)$$

gilt. Analog zu der berechneten Gâteaux-Ableitung von J in Lemma 2.11, gilt

$$\mathcal{D}_{v-u}J(u) = \frac{d}{dt}J(u + t(v - u))\Big|_{t=0} = a(u, v - u) - (f, v - u)$$

und damit folgt mit (3.4) die Behauptung. \square

Bemerkung 3.3. Wie man mit Satz A.11 nachrechnen kann, gilt analog zu Satz 3.2 auch allgemeiner: Es sei $K \subset H$ eine konvexe Teilmenge eines Hilbertraumes H . Dann ist

$$\min_{v \in K} J(v) = \frac{1}{2}a(v, v) - F(v)$$

äquivalent zur Variationsungleichung: Finde $u \in K$, so dass

$$a(u, v - u) \geq F(v - u) \quad \forall v \in K,$$

wobei $F : H \rightarrow \mathbb{R}$ eine lineare stetige Abbildung ist.

Wie wir sehen, erhalten wir durch die Einführung einer Nebenbedingung keine Variationsgleichung mehr, wie in Kapitel 2.2, sondern eine Variationsungleichung. Anschaulich liegt dies daran, dass die Veränderung der auf die Membran wirkenden Flächenlast f nicht zwangsläufig eine Änderung in der Auslenkung u hervorrufen muss, da diese durch ψ behindert werden könnte.

Diese Ungleichungsrelation überträgt sich auch auf die äquivalente, starke Formulierung des Problems (3.1), die wir auch für das Hindernisproblem, analog zum homogenen Dirichlet-Problem, finden können.

Satz 3.4 (Starke Formulierung des Hindernisproblems). *Jede Lösung $u \in H^2(\Omega) \cap H_0^1(\Omega)$ des Problems*

$$\begin{aligned} -\Delta u - f &\geq 0, \\ u - \psi &\geq 0, \\ (u - \psi)(-\Delta u - f) &= 0 \end{aligned} \quad (3.5)$$

mit $\psi \in H^1(\Omega)$ erfüllt die Variationsungleichung (3.3). Umgekehrt ist jede Lösung $u \in H^2(\Omega) \cap K$ von (3.3) auch eine Lösung von (3.5).

3. Variationsungleichungen

Beweis. „ \Rightarrow “ Sei $u \in H^2(\Omega) \cap H_0^1(\Omega)$ eine Lösung von (3.5), dann gilt für ein beliebiges $v \in K$

$$\begin{aligned} \int_{\Omega} (-\Delta u - f)(v - u) dx &= \underbrace{- \int_{\Omega} \Delta u(v - u) dx}_{\stackrel{\text{Green}}{=} - \int_{\Omega} \nabla u \nabla(v - u) dx} - \int_{\Omega} f(v - u) dx \\ &\quad - \underbrace{\int_{\Gamma} (v - u) \partial_{\nu} u ds}_{=0} \\ &= \int_{\Omega} \nabla u \nabla(v - u) dx - \int_{\Omega} f(v - u) dx \\ &= a(u, v - u) - (f, v - u). \end{aligned}$$

Mit $\Omega_0 := \{x \in \Omega \mid u = \psi\}$ folgt, dass $-\Delta u = f$ auf $\Omega_1 := \Omega \setminus \bar{\Omega}_0$ gelten muss. Hieraus ergibt sich

$$\int_{\Omega=\Omega_0 \cup \Omega_1} \underbrace{(-\Delta u - f)(v - u)}_{=0 \text{ auf } \Omega_1} dx = \int_{\Omega_0} \underbrace{(-\Delta u - f)}_{\geq 0} \underbrace{(v - \psi)}_{\geq 0} dx \geq 0.$$

Damit ist u eine Lösung von (3.3)

$$a(u, v - u) \geq (f, v - u) \quad \forall v \in K.$$

„ \Leftarrow “ Es sei $u \in H^2(\Omega) \cap K$ Lösung von (3.3). Weiter sei $v \in K$ beliebig, dann gilt

$$\begin{aligned} 0 &\leq a(u, v - u) - (f, v - u) \\ &= \int_{\Omega} \nabla u \nabla(v - u) dx - \int_{\Omega} f(v - u) dx \\ &\stackrel{\text{Green}}{=} \int_{\Omega} -\Delta u(v - u) dx - \int_{\Omega} f(v - u) dx \\ &= \int_{\Omega} (-\Delta u - f)(v - u) dx. \end{aligned} \tag{3.6}$$

Wir nehmen an, dass $-\Delta u - f < 0$ in einem Ball $B_{r_0} := B_{r_0}(x_0) \subset \Omega$ mit Radius r_0 um $x_0 \in \Omega$ gilt. Sei weiter $\chi \in C^{\infty}(\Omega)$ mit $\chi = 0$ auf $\Omega \setminus \bar{B}_{r_0}$, $\rho(r) := \left(1 - \frac{r}{r_0}\right)^2 \chi > 0$ und $v := u + \rho(r) \in K$, da $u \in K$ und $\rho(r) > 0$. Dann gilt

$$\int_{\Omega} (-\Delta u - f)(v - u) dx = \int_{B_{r_0}} \underbrace{(-\Delta u - f)}_{<0} \underbrace{\rho(r)}_{>0} dx < 0,$$

was im Widerspruch zu (3.6) steht. Also muss $-\Delta u - f \geq 0$ gelten.

Nun nehmen wir an, dass $-\Delta u - f > 0$ und $u > \psi$ fast überall in einem Ball B_{r_0} gilt. Wir betrachten $v := u + \varepsilon \rho(r)(\psi - u) \in K$ mit $0 < \varepsilon \leq 1$, dann folgt

$$\int_{\Omega} (-\Delta u - f)(v - u) dx = \varepsilon \int_{B_{r_0}} \underbrace{(-\Delta u - f)}_{>0} \underbrace{\rho(r)}_{>0} \underbrace{(\psi - u)}_{<0} dx < 0,$$

3. Variationsungleichungen

was wiederum im Widerspruch zu (3.6) steht. Damit muss $u = \psi$ gelten, wenn $-\Delta u = f$ ist. Es folgt, dass $u \in H^2(\Omega) \cap K$ eine Lösung von (3.5) ist. \square

3.1.2 Existenz und Eindeutigkeit der Lösung

Wir wollen nun die Existenz und Eindeutigkeit der Lösung des Hindernisproblems (3.2) bzw. der Variationsungleichung (3.3) überprüfen. Hierzu betrachten wir zunächst wieder allgemein das reelle, quadratische Funktional

$$J : H \rightarrow \mathbb{R}, \quad J(v) = \frac{1}{2}a(v, v) - F(v).$$

Folgende Voraussetzungen wollen wir für den Beweis der Existenz und Eindeutigkeit der Lösung annehmen.

Voraussetzung 3.5. Sei H ein reeller Hilbertraum mit Skalarprodukt $(\cdot, \cdot)_H$ und der damit induzierten Norm $\|\cdot\|_H$. Mit H' bezeichnen wir den Dualraum zu H . Weiter sei vorausgesetzt:

- (a) $a : H \times H \rightarrow \mathbb{R}$ ist eine stetige, koerzive Bilinearform,
- (b) $F : H \rightarrow \mathbb{R}$ ist ein stetiges, lineares Funktional,
- (c) $K \neq \emptyset$ ist eine abgeschlossene, konvexe Teilmenge von H .

Theorem 3.6 (Existenz und Eindeutigkeit). *Unter den obigen Voraussetzungen 3.5 hat die Variationsungleichung: Finde $u \in K$, so dass*

$$a(u, v - u) \geq F(v - u) \quad \forall v \in K \tag{3.7}$$

ist, genau eine Lösung.

Beweis. (i) Eindeutigkeit: Es seien $u_1, u_2 \in K$ zwei Lösungen der Variationsungleichung (3.7), d.h.

$$a(u_1, v - u_1) \geq F(v - u_1) \quad \forall v \in K, \tag{3.8}$$

$$a(u_2, v - u_2) \geq F(v - u_2) \quad \forall v \in K. \tag{3.9}$$

Addieren wir (3.8) und (3.9) miteinander und setzen zuvor $v = u_2$ in (3.8) und $v = u_1$ in (3.9), so erhalten wir

$$\begin{aligned} 0 &\leq a(u_1, u_2 - u_1) - F(u_2 - u_1) + a(u_2, u_1 - u_2) - \underbrace{F(u_1 - u_2)}_{=F(u_2 - u_1)} \\ &= a(u_1, u_2 - u_1) - a(u_2, u_2 - u_1) = -a(u_2 - u_1, u_2 - u_1) \\ &\leq -\alpha \|u_2 - u_1\|_H^2. \end{aligned}$$

Also gilt $\|u_2 - u_1\|_H^2 \leq 0 \Rightarrow \|u_2 - u_1\|_H^2 = 0$ und damit folgt $u_1 = u_2$.

3. Variationsungleichungen

(ii) Existenz: Aus dem Darstellungssatz von Riesz bzw. das Lemma 2.16 folgt, dass ein $A \in \mathcal{L}(H, H), l \in H$ existiert, so dass

$$\begin{aligned} a(u, v) &= (Au, v)_H \quad \forall u, v \in H, \\ F(v) &= (l, v)_H \quad \forall v \in H. \end{aligned}$$

Damit gilt

$$\begin{aligned} F(v - u) - a(u, v - u) &= (l, v - u)_H - (Au, v - u)_H \\ &= (l - Au, v - u)_H \leq 0. \end{aligned}$$

Durch Multiplikation mit $\varrho > 0$ und Addition der Null erhalten wir das äquivalente Problem: Finde $u \in K$, so dass

$$(u - \varrho(Au - l) - u, v - u)_H \leq 0 \quad \forall v \in K. \quad (3.10)$$

Nach Satz 2.3 ist u damit das Bild der Projektion von $u - \varrho(Au - l)$ auf K , d.h.

$$u = P_K(u - \varrho(Au - l)).$$

Es bleibt daher zu zeigen, dass $W_\varrho : H \rightarrow K, W_\varrho(v) := P_K(v - \varrho(Av - l))$ einen Fixpunkt besitzt. Mit Anwendung von Satz 2.4 und der Koerzivität von a rechnen wir nach, dass

$$\begin{aligned} \|W_\varrho(v_1) - W_\varrho(v_2)\|_H^2 &= \|P_K(v_1 - \varrho(Av_1 - l)) - P_K(v_2 - \varrho(Av_2 - l))\|_H^2 \\ &\leq \|v_1 - \varrho(Av_1 - l) - (v_2 - \varrho(Av_2 - l))\|_H^2 \\ &= \|(v_1 - v_2) - \varrho A(v_1 - v_2)\|_H^2 \\ &= \|v_1 - v_2\|_H^2 + \varrho^2 \|A(v_1 - v_2)\|_H^2 \\ &\quad - \underbrace{\varrho (A(v_1 - v_2), v_1 - v_2)_H - \varrho (v_1 - v_2, A(v_1 - v_2))_H}_{=2\varrho (A(v_1 - v_2), v_1 - v_2)_H = 2\varrho a(v_1 - v_2, v_1 - v_2)} \\ &\leq \|v_1 - v_2\|_H^2 + \varrho^2 \|A\|^2 \|v_1 - v_2\|_H^2 - 2\varrho \alpha \|v_1 - v_2\|_H^2 \\ &= (1 - 2\varrho \alpha + \varrho^2 \|A\|^2) \|v_1 - v_2\|_H^2 \end{aligned}$$

mit $\|A\| := \sup_{v \in H} \frac{\|Av\|_H}{\|v\|_H}$ gilt. Also ist die Abbildung W_ϱ eine Kontraktion, wenn gilt

$$1 - 2\varrho \alpha + \varrho^2 \|A\|^2 < 1 \implies 0 < \varrho < \frac{2\alpha}{\|A\|^2}.$$

Nach dem Banach'schen Fixpunktsatz (vgl. [Sto99] Satz 5.2.3) existiert für solch ein ϱ ein $u \in H$ mit $u = W_\varrho(u) = P_K(u - \varrho(Au - l))$.

Insgesamt gibt es also für das Problem (3.7) genau eine Lösung. \square

3. Variationsungleichungen

Korollar 3.7. *Das Problem (3.1) hat eine eindeutige Lösung.*

Beweis. Da laut Lemma 3.1 die Menge

$$K = \{v \in H_0^1(\Omega) \mid v \geq \psi \text{ fast überall in } \Omega\}$$

abgeschlossen und konvex ist, $F(v) = (f, v)$ ein stetiges, lineares Funktional und

$$a(u, v) = \int_{\Omega} \nabla u \nabla v \, dx$$

stetig, bilinear und koerziv ist, sind die Voraussetzungen für Theorem 3.6 erfüllt. Damit hat das Problem, finde $u \in K$, so dass

$$a(u, v - u) \geq (f, v - u) \quad \forall v \in K, \quad (3.11)$$

genau eine Lösung. Nach Satz 3.2 ist die Minimierung des Funktionals (3.1) äquivalent zur Variationsungleichung (3.11) und damit folgt die Behauptung. \square

Bemerkung 3.8. Insbesondere hat auch das Problem (3.5) nach Satz 3.4 und Theorem 3.6 eine eindeutige Lösung, wenn $u \in H^2(\Omega) \cap H_0^1(\Omega)$ ist.

3.1.3 Lösung des Hindernisproblems mittels FEM

Analog zu Kapitel 2.3 können wir nun auch die Variationsungleichung (3.11) mittels FEM lösen. Hierzu betrachten wir (3.11) bzgl. eines endlich dimensionalen Unterraum

$$K_h := \{v_h \in V_h \mid v_h(p) \geq \psi(p) \forall p \in \mathcal{N} \cap \Omega\},$$

wobei \mathcal{N} die Knotenmenge bzgl. der Triangulierung \mathcal{T}_h bezeichnet und V_h wie oben ein endlich dimensionaler Unterraum eines Hilbertraumes H ist. Damit schreibt sich (3.11) in diskreter Form: Finde $u_h \in K_h$, so dass

$$a(u_h, v_h - u_h) \geq (f, v_h - u_h) \quad \forall v_h \in K_h. \quad (3.12)$$

Auch für das diskrete Problem existiert eine eindeutige Lösung, wie sich mithilfe des nächsten Satzes zeigen lässt.

Satz 3.9 (Fixpunktsatz von Brouwer). *Es sei $K \neq \emptyset$ eine kompakte, konvexe Teilmenge eines endlich dimensionalen normierten Raumes H und $F : K \rightarrow K$ sei stetig. Dann besitzt F einen Fixpunkt $v \in K$.*

Beweis. Der Beweis ist in [Wer11] Kapitel 4 Satz 7.15 zu finden. \square

Theorem 3.10 (Existenz und Eindeutigkeit). *Es gelten die Voraussetzungen 3.5. Das Problem (3.12) hat eine eindeutige Lösung $u_h \in K_h$.*

3. Variationsungleichungen

Beweis. Der Beweis ist analog zu Theorem 3.6 zu führen. Wir ersetzen lediglich H durch V_h und K durch K_h und verwenden im endlich dimensionalen Raum V_h den Fixpunktsatz von Brouwer. \square

Bemerkung. In Kapitel 2.2 von [Sta08] sind die Argumente bzgl. der Existenz und Eindeutigkeit einer Lösung von (3.11) für den endlich dimensionalen Fall K_h auch noch einmal im Einzelnen aufgeführt.

Es sei $\mathcal{B}_h = \{\phi_1, \dots, \phi_N\}$ eine nodale Basis von V_h , d.h. analog zu (2.11) können wir u_h und v_h mit Koordinaten $\mu_i, \nu_i, i = 1, \dots, N$ bzgl. \mathcal{B}_h ausdrücken. Dann schreiben wir (3.12) als

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \mu_i a(\phi_i, \phi_j) (\nu_j - \mu_j) \geq \sum_{j=1}^N (f, \phi_j) (\nu_j - \mu_j) \\ \iff & \boldsymbol{\mu}^T A(\boldsymbol{\nu} - \boldsymbol{\mu}) \geq \mathbf{f}^T (\boldsymbol{\nu} - \boldsymbol{\mu}) \end{aligned}$$

mit $A = [a(\phi_j, \phi_i)]_{i,j=1}^N$, $\boldsymbol{\mu} = [\mu_i]_{i=1}^N$, $\boldsymbol{\nu} = [\nu_i]_{i=1}^N$ und $\mathbf{f} = [(f, \phi_i)]_{i=1}^N$. Damit lässt sich die Menge K_h auch eindeutig durch die Koordinatenvektoren bzgl. \mathcal{B}_h ausdrücken. Die Menge K_h ist bzgl. V_h äquivalent zu

$$K_S := \{\boldsymbol{\nu} \in \mathbb{R}^N \mid \nu_i \geq \psi(p_i), p_i \in \mathcal{N} \cap \Omega, i = 1, \dots, N\}. \quad (3.13)$$

Im Folgenden schreiben wir $\boldsymbol{\psi} := [\psi(p_i)]_{i=1}^N$ mit $p_i \in \mathcal{N} \cap \Omega$.

Bemerkung. K_h bzw. K_S sind analog zu K konvex und abgeschlossen.

Damit erhalten wir aus (3.12) die diskrete Variationsungleichung: Finde $\boldsymbol{\mu} \in K_S$, so dass

$$(A\boldsymbol{\mu} - \mathbf{f})^T (\boldsymbol{\nu} - \boldsymbol{\mu}) \geq 0 \quad \forall \boldsymbol{\nu} \in K_S. \quad (3.14)$$

Es fehlt uns nun jedoch die Möglichkeit solch eine Ungleichung, die offensichtlich nicht mehr linear ist, zu lösen. Wir wollen also (3.14) mathematisch äquivalent formulieren, um das erzeugte Problem lösen zu können.

Satz 3.11. Das Problem (3.14) ist äquivalent zum linearen Komplementaritätsproblem: Bestimme $\boldsymbol{\mu} \in K_S$, so dass

$$A\boldsymbol{\mu} - \mathbf{f} \geq \mathbf{0} \quad \text{und} \quad (A\boldsymbol{\mu} - \mathbf{f})^T (\boldsymbol{\mu} - \boldsymbol{\psi}) = 0 \quad (3.15)$$

gilt.

Beweis. „ \Rightarrow “ Sei $\boldsymbol{\mu} \in K_S$ Lösung von (3.14). Wir setzen $\boldsymbol{\nu} = \boldsymbol{\mu} + \mathbf{e}_i \geq \boldsymbol{\psi}$ mit einem beliebigen $i \in \{1, \dots, N\}$, wobei \mathbf{e}_i den i -ten Einheitsvektor bezeichnet. Dann gilt

$$0 \leq (A\boldsymbol{\mu} - \mathbf{f})^T (\boldsymbol{\nu} - \boldsymbol{\mu}) = (A\boldsymbol{\mu} - \mathbf{f})^T \mathbf{e}_i = (A\boldsymbol{\mu} - \mathbf{f})_i.$$

Da i beliebig war, folgt $A\boldsymbol{\mu} - \mathbf{f} \geq \mathbf{0}$.

3. Variationsungleichungen

Wir nehmen nun an, dass ein $i \in \{1, \dots, N\}$ existiert, so dass

$$(A\mu - f)_i(\mu - \psi)_i > 0$$

ist. Weiter wählen wir

$$\nu = \begin{pmatrix} \mu_1 \\ \vdots \\ \mu_{i-1} \\ 0 \\ \mu_{i+1} \\ \vdots \\ \mu_N \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \psi_i \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \geq \psi$$

und damit folgt

$$0 > (A\mu - f)_i(\psi - \mu)_i = (A\mu - f)^T(\nu - \mu) \geq 0,$$

was im Widerspruch zu (3.14) steht. Daraus folgt die Behauptung.

„ \Leftarrow “ Es sei $\mu \in K_S$ Lösung von (3.15). Dann rechnen wir nach, dass für ein beliebiges $\nu \in K_S$ gilt

$$\begin{aligned} (A\mu - f)^T(\nu - \mu) &= (A\mu - f)^T(\nu - \psi + \psi - \mu) \\ &= \underbrace{(A\mu - f)^T(\nu - \psi)}_{\geq 0} - \underbrace{(A\mu - f)^T(\mu - \psi)}_{=0} \\ &\geq 0. \end{aligned} \quad \square$$

Satz 3.12 (Äquivalenz zu quadratischem Programm). *Das Problem (3.14) ist äquivalent zum quadratischen Programm*

$$\min_{\nu \in \mathbb{R}^N} J(\nu) = \frac{1}{2} \nu^T A \nu - f^T \nu \quad s.t. \quad \nu \geq \psi. \quad (3.16)$$

Beweis. Wir zeigen zunächst die Äquivalenz von (3.15) zu (3.16) und dann folgt mit Satz 3.11 die Behauptung.

„ \Rightarrow “ Es sei $\mu \in \mathbb{R}^N$ Lösung vom Problem (3.15). Dann folgt mit einem beliebigen $\nu \in K_S$

$$\begin{aligned} J(\nu) - J(\mu) &= \frac{1}{2} \nu^T A \nu - f^T \nu - \frac{1}{2} \mu^T A \mu + f^T \mu \\ &= \frac{1}{2} \underbrace{(\nu - \mu)^T A (\nu - \mu)}_{\geq 0 \text{ wegen Bem. 2.18}} + \mu^T A \nu - \mu^T A \mu - f^T (\nu - \mu) \\ &\geq (A\mu - f)^T(\nu - \psi + \psi - \mu) \\ &= \underbrace{(A\mu - f)^T(\nu - \psi)}_{\geq 0} - \underbrace{(A\mu - f)^T(\mu - \psi)}_{=0} \\ &\geq 0. \end{aligned}$$

3. Variationsungleichungen

Somit ist $\boldsymbol{\mu} \in K_S$ auch Lösung des quadratischen Programms (3.16).

„ \Leftarrow “ Sei $\boldsymbol{\mu} \in K_S$ Lösung von (3.16), dann gelten nach [NW06] Kapitel 12, Theorem 12.1 für die Lagrange-Funktion

$$\mathcal{L}(\boldsymbol{\nu}, \boldsymbol{\lambda}) = J(\boldsymbol{\nu}) - \boldsymbol{\lambda}^T(\boldsymbol{\nu} - \boldsymbol{\psi})$$

die Karush-Kuhn-Tucker Bedingungen für den Optimalpunkt $(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\lambda}^*)$

$$\nabla_{\boldsymbol{\nu}} \mathcal{L}(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\lambda}^*) = \nabla J(\boldsymbol{\mu}) - \boldsymbol{\lambda}^* = A\boldsymbol{\mu} - \mathbf{f} - \boldsymbol{\lambda}^* \stackrel{!}{=} \mathbf{0}, \quad (3.17a)$$

$$\boldsymbol{\mu} - \boldsymbol{\psi} \geq \mathbf{0}, \quad (3.17b)$$

$$\boldsymbol{\lambda}^* \geq \mathbf{0}, \quad (3.17c)$$

$$\lambda_i^*(\mu_i - \psi_i) = 0 \quad \forall i = 1, \dots, N. \quad (3.17d)$$

Mit (3.17a) gilt also $\boldsymbol{\lambda}^* = A\boldsymbol{\mu} - \mathbf{f}$ und daher folgt aus (3.17c)

$$A\boldsymbol{\mu} - \mathbf{f} \geq \mathbf{0}.$$

Aus (3.17d) folgt wegen $(A\boldsymbol{\mu} - \mathbf{f})_i(\mu_i - \psi_i) = 0$ für alle $i = 1, \dots, N$ direkt

$$(A\boldsymbol{\mu} - \mathbf{f})^T(\boldsymbol{\mu} - \boldsymbol{\psi}) = 0.$$

Also ist $\boldsymbol{\mu} \in K_S$ auch Lösung von (3.15). \square

Bemerkung 3.13. Analog zu Satz 3.11 und 3.12 können wir durch leichte Abwandlung der Beweise zeigen, dass das quadratische Programm

$$\min_{\boldsymbol{\nu} \in \mathbb{R}^N} J(\boldsymbol{\nu}) = \frac{1}{2} \boldsymbol{\nu}^T A \boldsymbol{\nu} - \mathbf{f}^T \boldsymbol{\nu} \quad \text{s.t.} \quad B\boldsymbol{\nu} \geq \boldsymbol{\psi} \quad (3.18)$$

mit $B \in \mathbb{R}^{M \times N}$ äquivalent ist zur Variationsungleichung: Finde $\boldsymbol{\mu} \in \mathbb{R}^N$ mit $B\boldsymbol{\mu} \geq \boldsymbol{\psi}$, so dass

$$(A\boldsymbol{\mu} - \mathbf{f})^T(\boldsymbol{\nu} - \boldsymbol{\mu}) \geq 0 \quad \forall \boldsymbol{\nu} \in \mathbb{R}^N \text{ mit } B\boldsymbol{\nu} \geq \boldsymbol{\psi}. \quad (3.19)$$

Diese Formulierung werden wir später in Kapitel 3.2.3 wiederfinden, wenn wir Kontaktprobleme mittels der Finiten-Elemente-Methode lösen werden.

Bemerkung 3.14. Die quadratischen Programme (3.16) und (3.18) haben mit den Voraussetzungen aus Bemerkung 2.18 eine globale Lösung $\boldsymbol{\mu}$, wenn diese die KKT-Bedingungen (B.3) erfüllt (vgl. Theorem B.1).

Da wir wegen Bemerkung 2.18 konvexe, quadratische Programme vorliegen haben, können wir diese mit dem in Anhang B.2 vorgestellten Active-Set-Algorithmus lösen. Wie wir später sehen werden, ist es sinnvoll bei der Implementierung auf eine Innere-Punkte-Methode (kurz: IPM) zurückzutreifen.

Es bleibt noch zu prüfen, ob die Lösung der Variationsungleichung für Netzverfeinerung an die exakte Lösung konvergiert. Folgende Voraussetzungen werden hierfür für die verwendeten Ansatzräume angenommen.

3. Variationsungleichungen

Voraussetzung 3.15. Gegeben sei ein Parameter $h \rightarrow 0$. Weiter seien $(V_h)_h$ eine Familie aus abgeschlossenen Teilmengen eines Hilbertraums H , $K \subset H$ eine nichtleere, konvexe, abgeschlossene Teilmenge und $(K_h)_h$ eine Familie von abgeschlossenen, konvexen, nichtleeren Teilmengen von H , so dass $K_h \subset V_h$ für alle h .

Dabei sei K_h eine Approximation von K im folgenden Sinne:

- (i) wenn $(v_h)_h$ eine in H beschränkte Folge mit $v_h \in K_h$ ist, dann folgt $v_h \rightarrow v \in K$,
- (ii) es existiert ein $W \subset H$ mit $\overline{W} = K$ und ein $I_h : W \rightarrow K_h$, so dass

$$\lim_{h \rightarrow 0} I_h v = v$$

stark in H für alle $v \in W$ konvergiert.

Theorem 3.16 (a priori Konvergenz). *Mit den obigen Voraussetzungen für K und $(K_h)_h$ gilt für die Lösungen u von (3.7) und u_h vom approximierten Problem: Finde $u_h \in K_h$, so dass*

$$a(u_h, v_h - u_h) \geq F(v_h - u_h) \quad \forall v_h \in K_h, \quad (3.20)$$

der Zusammenhang

$$\lim_{h \rightarrow 0} \|u_h - u\|_H = 0.$$

Beweis. (i) Abschätzung von u_h : Es sei u_h Lösung von (3.20), dann gilt nach einer Umformung für alle $v_h \in K_h$

$$\begin{aligned} a(u_h, u_h) &\leq a(u_h, v_h) - F(v_h - u_h) \\ &= (Au_h, v_h)_H - (f, v_h - u_h)_H \\ &\stackrel{\text{CS}}{\leq} \underbrace{\|Au_h\|_H}_{\leq \|A\| \|u_h\|_H} \|v_h\|_H + \|f\|_H \underbrace{\|v_h - u_h\|_H}_{\leq \|v_h\|_H + \|u_h\|_H} \\ &\leq \|A\| \|u_h\|_H \|v_h\|_H + \|f\|_H (\|v_h\|_H + \|u_h\|_H). \end{aligned}$$

Zusammen mit der Koerzivität folgt dann

$$\alpha \|u_h\|_H^2 \leq \|A\| \|u_h\|_H \|v_h\|_H + \|f\|_H (\|v_h\|_H + \|u_h\|_H). \quad (3.21)$$

Wähle ein festes $v_0 \in W$, sodass $I_h v_0 = v_h \in K_h$ gilt. Aus Voraussetzung 3.15 (ii) folgt dann

$$\lim_{h \rightarrow 0} I_h v_0 = v_0$$

3. Variationsungleichungen

und daher muss v_h beschränkt sein, d.h. es existiert ein $m \in \mathbb{R} : \|v_h\|_H \leq m$ für alle h . Zusammen mit (3.21) gilt dann

$$\begin{aligned}\|u_h\|_H^2 &\leq \frac{1}{\alpha}(m\|A\|\|u_h\|_H + \|f\|_H(m + \|u_h\|_H)) \\ &= \underbrace{\left(\frac{m}{\alpha}\|A\| + \|f\|_H\right)}_{=:c_1}\|u_h\|_H + \underbrace{\frac{m}{\alpha}\|f\|_H}_{=:c_2} \\ &= c_1\|u_h\|_H + c_2\end{aligned}$$

und damit können wir anhand quadratischer Ergänzung folgern, dass es ein $c \in \mathbb{R}$ gibt mit $\|u_h\| \leq c$ für alle h , d.h. $(u_h)_h$ ist gleichmäßig beschränkt.

(ii) schwache Konvergenz: Da $(u_h)_h$ in H gleichmäßig beschränkt ist, folgt mit Bemerkung A.14 (b), dass es eine schwach konvergente Teilfolge $(u_{h_j})_{h_j} \in K_{h_j}$ mit einem Grenzwert u^* in H gibt, d.h.

$$u_{h_j} \rightharpoonup u^* \in H.$$

Mit den Voraussetzung 3.15 (i) für $(K_h)_h$ folgt direkt $u^* \in K$, außerdem ist u^* nach Bemerkung A.14 (e) eindeutig.

Wir zeigen nun, dass u^* eine Lösung von (3.7) ist. Für die oben betrachtete Teilfolge gilt

$$a(u_{h_j}, v_{h_j} - u_{h_j}) \geq F(v_{h_j} - u_{h_j}) \quad \forall v_{h_j} \in K_{h_j}. \quad (3.22)$$

Sei $v \in W$ mit $v_{h_j} = I_{h_j}v$. Dann gilt $v_{h_j} = I_{h_j}v \rightarrow v \in W$ für $h_j \rightarrow 0$. Mit (3.22) folgt

$$\begin{aligned}a(u_{h_j}, u_{h_j}) &\leq a(u_{h_j}, v_{h_j}) - F(v_{h_j} - u_{h_j}) \\ &= a(u_{h_j}, I_{h_j}v) - F(v_{h_j} - u_{h_j}) \\ \implies \liminf_{h_j \rightarrow 0} a(u_{h_j}, u_{h_j}) &\leq a(u^*, v) - F(v - u^*).\end{aligned} \quad (3.23)$$

Weiter schätzen wir durch Bemerkung A.14 (f) nach unten ab

$$\liminf_{h_j \rightarrow 0} a(u_{h_j}, u_{h_j}) = \liminf_{h_j \rightarrow 0} \|u_{h_j}\|_H^2 \geq \|u^*\|_H^2 = a(u^*, u^*). \quad (3.24)$$

Insgesamt folgt also mit (3.23) und (3.24)

$$a(u^*, u^*) \leq \liminf_{h_j \rightarrow 0} a(u_{h_j}, u_{h_j}) \leq a(u^*, v) - F(v - u^*)$$

und damit nach Umformung

$$a(u^*, v - u^*) \geq F(v - u^*) \quad \forall v \in W.$$

Da W dicht in K liegt, d.h. $\overline{W} = K$, und a, F stetig sind, erhalten wir

$$a(u^*, v - u^*) \geq F(v - u^*) \quad \forall v \in K$$

3. Variationsungleichungen

mit $u^* \in K$, also ist $u^* =: u$ Lösung von (3.7). Da u ein Häufungspunkt von $(u_h)_h$ bzgl. der schwachen Topologie von H ist, konvergiert auch die Folge $(u_h)_h$ schwach gegen u .

(iii) starke Konvergenz: Aus der Koerzivität von a folgt

$$\begin{aligned} 0 &\leq \alpha \|u_h - u\|_H^2 \leq a(u_h - u, u_h - u) \\ &= a(u_h, u_h) - a(u_h, u) - a(u, u_h) + a(u, u), \end{aligned} \quad (3.25)$$

wobei u_h Lösung des approximierten Problems (3.20) und u Lösung des exakten Problems (3.7) ist. Es sei $v \in W$ mit $I_h v = v_h \in K_h$, dann folgt aus (3.20)

$$a(u_h, u_h) \leq a(u_h, I_h v) - F(I_h v - u_h) \quad \forall v \in W. \quad (3.26)$$

Da $u_h \rightarrow u$ in H und $I_h v \rightarrow v$ in H für $h \rightarrow 0$, folgt aus (3.25) und (3.26) unter Verwendung von Voraussetzungen (ii)

$$0 \leq \alpha \lim_{h \rightarrow 0} \|u_h - u\|_H^2 \leq a(u, v - u) - F(v - u) \quad \forall v \in W. \quad (3.27)$$

Da a und F stetig sind und W dicht in K liegt, gilt (3.27) auch für alle $v \in K$. Setzen wir dann also $v = u$ in (3.27), dann folgt die Behauptung $\lim_{h \rightarrow 0} \|u_h - u\|_H^2 = 0$. \square

Es sei $V_h \subset H_0^1(\Omega)$ ein beliebiger endlich dimensionaler Unterraum von $H_0^1(\Omega)$ und K_h wie zu Beginn dieses Kapitels definiert. Dann ist $K_h \subset V_h$ für alle Parameter h . Außerdem folgt Voraussetzung 3.15 (i) wegen der Abgeschlossenheit von K_h . Betrachten wir

$$W := \{v \in H_0^1(\Omega) \mid v > \psi \text{ f.ü. in } \Omega\},$$

so gilt $\overline{W} = K$ und mit der bekannten Spline-Interpolation folgt dann auch Voraussetzung 3.15 (ii). Damit gilt

$$\lim_{h \rightarrow 0} \|u_h - u\|_1 = 0.$$

Es lässt sich folglich auch eine a priori Abschätzung für den Fehler von u und u_h herleiten. Die Herleitung ist detailliert unter anderem in [Fal74] wiederzufinden.

Theorem 3.17 (a priori Fehlerabschätzung). *Seien u und u_h die Lösungen von (3.7) und (3.20). Dann existiert eine Konstante $C := C(\Omega, f, \psi)$ unabhängig von u , so dass*

$$\|u_h - u\|_1 \leq Ch.$$

Beweis. Vgl. [Fal74] Theorem 2 bzw. [Ste12b] Theorem 6.4. \square

Damit führt die Netzverfeinerung also zur exakten Lösung der Variationsungleichung (3.11). Inwiefern adaptive Netzverfeinerung hier sinnvoll ist, wollen wir in Kapitel 4 betrachten.

3.2 Kontaktprobleme

Das in Kapitel 3.1 vorgestellte Hindernisproblem ist ein Modellproblem zur Minimierung eines Energiefunktionalen unter Nebenbedingung. Kontaktprobleme sind Probleme aus der Strukturmechanik, die auch auf eine Variationsungleichung führen. Daher können wir die Ideen zur Lösung eines Hindernisproblems auf diese Problemstellung übertragen.

3.2.1 Mathematische Modellierung eines Kontaktproblems

Zunächst wollen wir mithilfe der in Kapitel 2.5 eingeführten mechanischen Gleichungen ein Kontaktproblem mathematisch modellieren.

Voraussetzung 3.18. Wir treffen folgende Annahmen für unser Kontaktmodell:

- (a) Die in Kontakt stehenden Körper sind beschränkt.
- (b) Es liegen linear elastische Materialien mit kleinen Deformationen vor.
- (c) Wir betrachten ein konstantes Temperaturfeld, d.h. thermodynamische Prozesse werden ausgeschlossen.
- (d) Zu Beginn, also in der Ausgangskonfiguration, gilt für die Spannung und Verzerrung

$$\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{0}, \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \mathbf{0}.$$

- (e) Wir gehen von einem reibungslosen Kontakt aus. Diese Art von Kontaktproblem wird als *Signorini-Kontakt-Problem* bezeichnet.
- (f) Wir gehen von ebenen Problemen aus, d.h. $\Omega \subset \mathbb{R}^2$. Im \mathbb{R}^3 sind alle Resultate analog.

Zur Herleitung der starken Kontaktformulierung wollen wir zwei Körper $\mathcal{B}^1, \mathcal{B}^2$ betrachten, welche wegen Voraussetzung 3.18 (a) durch zwei beschränkte Gebiete Ω^1, Ω^2 mathematisch beschrieben werden können. Diese Voraussetzung lässt sich auch auf beliebig viele Körper verallgemeinern (vgl. hierfür [CSW99]).

Weiter lassen sich die Ränder $\Gamma^i = \partial\Omega^i$, $i = 1, 2$, in drei disjunkte Teile unterteilen (s. Abbildung 3.2):

Γ_u^i : Der *Dirichlet-Rand*, oder auch *Verschiebungsrand*, auf dem die Werte von der Verschiebung \mathbf{u} vorgegeben sind.

Γ_σ^i : Der *Neumann-Rand*, oder auch *Spannungsrand*, auf dem die Oberflächenlast bzw. -spannung $\bar{\mathbf{t}}$ vorgegeben ist.

Γ_c^i : Der *Kontaktrand*, auf dem die Kontaktbedingungen definiert sind.

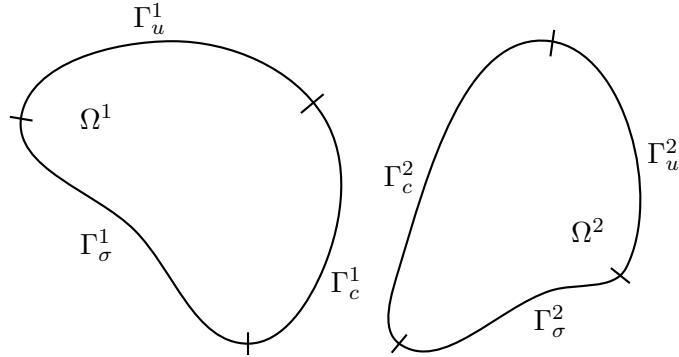


Abbildung 3.2: Körper \mathcal{B}^1 und \mathcal{B}^2 mit Randbezeichnungen

Kontaktkinematik

Wir betrachten zunächst die Kontaktkinematik (wie in [CSW99]) etwas allgemeiner, als in [Wri01] oder [Wri06] beschrieben. Für die Formulierung der Kontaktbedingungen werden den Körpern $\mathcal{B}^1, \mathcal{B}^2$ die Bezeichnungen *Master* und *Slave* zugeordnet. Mit Slave bezeichnen wir dabei die Menge an Punkten, für die überprüft wird, ob sie in die Master-Fläche eindringen. Die Zuordnung von Master und Slave ist jedoch für das Ergebnis der Kontaktbedingung vollkommen irrelevant. Es sei daher o.B.d.A. \mathcal{B}^1 der Slave.

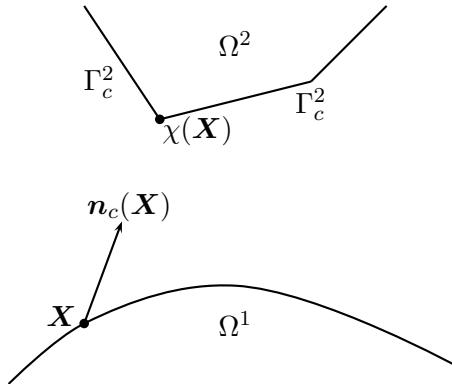


Abbildung 3.3: Kontaktformulierung zwischen zwei Körpern

Für einen gegebenen Punkt $\mathbf{X} \in \Omega^1$, bzw. $\mathbf{X} \in \Gamma_c^1$, in der Ausgangskonfiguration ist $\bar{\mathbf{X}} := \chi(\mathbf{X})$ derjenige Punkt aus Γ^2 , der minimalsten Abstand zu \mathbf{X} hat, d.h.

$$\|\mathbf{X} - \bar{\mathbf{X}}\| = \min\{\|\mathbf{X} - \mathbf{Y}\| \mid \mathbf{Y} \in \Gamma^2\},$$

also ist $\chi : \Gamma_c^1 \cup \Gamma_c^2 \rightarrow \Gamma^1 \cup \Gamma^2$ eine Abbildung der kleinsten Distanz (s. Abbildung 3.3). Damit definieren wir entsprechend die *kritische Richtung*

3. Variationsungleichungen

mit Länge 1 als

$$\mathbf{n}_c(\mathbf{X}) := \frac{\chi(\mathbf{X}) - \mathbf{X}}{\|\chi(\mathbf{X}) - \mathbf{X}\|}, \quad (3.28)$$

wobei im Falle $\mathbf{X} = \chi(\mathbf{X})$, d.h. im Falle des Kontaktes, für $\mathbf{n}_c(\mathbf{X})$ eine beliebige normierte Richtung gesetzt wird. Den Punkt $\bar{\mathbf{X}}$ nennen wir analog *kritischen Punkt*.

Bemerkung 3.19. Der Punkt $\bar{\mathbf{X}}$ heißt deshalb kritischer Punkt, da er wegen des kleinsten Abstandes zu \mathbf{X} der wohlmöglich nächste Punkt ist, der mit \mathbf{X} in Kontakt tritt. Der Vorteil dieser Formulierung ist, dass die kritische Richtung $\mathbf{n}_c(\mathbf{X})$ auch existiert, wenn der Rand eines Körpers nicht hinreichend glatt ist.

In den Koordinaten der Momentankonfiguration gilt $\mathbf{x} = \mathbf{X} + \mathbf{u}(\mathbf{X})$ für das Verschiebungsfeld \mathbf{u} und damit erhalten wir die *Nichtdurchdringungsbedingung*

$$(\bar{\mathbf{x}} - \mathbf{x}) \mathbf{n}_c(\mathbf{X}) \geq 0, \quad (3.29)$$

wobei $\bar{\mathbf{x}} := \bar{\mathbf{X}} + \mathbf{u}(\bar{\mathbf{X}})$ ist. Dies bedeutet, dass die Verbindung der Punkte in der Momentankonfiguration mit der kritischen Richtung einen Winkel $\alpha \in [-\frac{\pi}{2}, \frac{\pi}{2}]$ einschließen muss, andernfalls läge $\bar{\mathbf{x}}$ „hinter“ \mathbf{x} , d.h. \mathcal{B}^1 wäre in \mathcal{B}^2 eingedrungen. Aus (3.29) folgt

$$\begin{aligned} 0 &\leq (\bar{\mathbf{x}} - \mathbf{x}) \mathbf{n}_c(\mathbf{X}) = (\bar{\mathbf{X}} + \mathbf{u}(\bar{\mathbf{X}}) - \mathbf{X} - \mathbf{u}(\mathbf{X})) \mathbf{n}_c(\mathbf{X}) \\ &= (\bar{\mathbf{X}} - \mathbf{X}) \underbrace{\frac{\bar{\mathbf{X}} - \mathbf{X}}{\|\bar{\mathbf{X}} - \mathbf{X}\|}}_{=\|\bar{\mathbf{X}} - \mathbf{X}\|=:g} + (\mathbf{u}(\bar{\mathbf{X}}) - \mathbf{u}(\mathbf{X})) \mathbf{n}_c(\mathbf{X}) \\ &= g + (\mathbf{u}(\chi(\mathbf{X})) - \mathbf{u}(\mathbf{X})) \mathbf{n}_c(\mathbf{X}), \end{aligned}$$

was uns die Nichtdurchdringungsbedingung bzgl. der Ausgangskonfiguration liefert, wobei wir die Funktion g auch als *Gap-Funktion* bezeichnen, da sie die Lücke zwischen den Körpern beschreibt.

Aufgrund von Voraussetzung 3.18 (b) gehen wir von kleinen Deformationen aus. Damit gilt unter anderem $\mathbf{X} \approx \mathbf{x}$, $\nabla_{\mathbf{X}} = \text{Grad}(\cdot) \approx \text{grad}(\cdot) = \nabla_{\mathbf{x}}$ (vgl. [Alt12] S. 122f). Daher schreiben wir im folgenden immer \mathbf{x} statt \mathbf{X} . Insgesamt lässt sich also die Nichtdurchdringungsbedingung schreiben als

$$(\mathbf{u} \circ \chi - \mathbf{u}) \cdot \mathbf{n}_c + g \geq 0 \quad \forall \mathbf{x} \in \Gamma_c, \quad (3.30)$$

wobei $\Gamma_c := \Gamma_c^1 \cup \Gamma_c^2$ ist.

Der Einfachheit halber wollen wir in dieser Arbeit noch weitere Forderungen an die beiden Körper \mathcal{B}^1 und \mathcal{B}^2 stellen. Wir fordern, dass die Ränder Γ^i hinreichend glatt sind. Daraus folgt, dass (3.30) auch für \mathbf{n}_c als

3. Variationsungleichungen

Einheitsnormale von \mathcal{B}^1 gilt. Weiter soll $\mathbf{u}(\bar{\mathbf{x}}) \equiv \mathbf{0}$ gelten, d.h. falls \mathcal{B}^2 ein Verschiebungsfeld ungleich Null hat, können wir \mathbf{u} bzgl. $\Omega = \Omega^1 \cup \Omega^2$ auch als Relativverschiebung interpretieren.

Im numerischen Beispiel wollen wir später \mathcal{B}^1 als feste Ebene verwenden. Damit reduziert sich (3.30) auf

$$\mathbf{u} \cdot \mathbf{n} - g \leq 0 \quad \forall x \in \Gamma_c, \quad (3.31)$$

wobei wir auch $u_n := \mathbf{u} \cdot \mathbf{n}$ im Folgenden schreiben werden. Weiter muss auf dem Kontaktrand Γ_c die Normalkraft eine Druckkraft sein oder es herrscht Kräftegleichgewicht, d.h. für $\sigma_n := \mathbf{n} \cdot (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n})$, also die Spannung in Normalenrichtung, gilt

$$\sigma_n \leq 0 \quad \text{auf } \Gamma_c. \quad (3.32)$$

Wenn die Kontaktbedingung nicht aktiv ist, d.h. wenn keine Gleichheit gilt, muss Kräftegleichgewicht herrschen, d.h. in (3.32) gilt die Gleichheit. Zusammen erhält man die *Komplementaritätsbedingung*

$$(u_n - g) \sigma_n = 0 \quad \text{auf } \Gamma_c. \quad (3.33)$$

Laut der Voraussetzung (e) betrachten wir den Signorini-Kontakt (d.h. keine Reibung) und damit muss die Tangentialkraft auf dem Kontaktrand gleich Null sein, d.h.

$$\boldsymbol{\sigma}_t := \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} - \sigma_n \mathbf{n} = 0 \quad \text{auf } \Gamma_c. \quad (3.34)$$

Bilanzgleichungen, materialunabhängige Gleichungen

Wie in Kapitel 2.5 eingeführt, gelten auch hier die Gleichung (2.32) des Kräftegleichgewichts. Da wir laut Voraussetzung (b) von kleinen Deformationen ausgehen, gilt

$$\operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} + \bar{\mathbf{b}} = \mathbf{0} \quad \text{in } \Omega. \quad (3.35)$$

Weiter gilt nach dem Cauchy-Theorem (2.29), dass die Spannung in Normalenrichtung auf der Rand Γ (speziell auf dem Neumann-Rand Γ_σ) von Ω gleich der von außen angebrachten Spannung $\bar{\mathbf{t}}$ ist, d.h.

$$\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n} = \bar{\mathbf{t}} \quad \text{auf } \Gamma_\sigma. \quad (3.36)$$

Konstitutive Gleichungen

Da wir laut Voraussetzung 3.18 (b) von einem linear elastischen Material und kleinen Deformationen ausgehen, gilt ein linearer Zusammenhang bzgl.

3. Variationsungleichungen

der Spannung σ und Verzerrung ε , deswegen verwenden wir das Hooke'sche Gesetz (2.33). Die kleinen Deformationen erlauben die Verwendung des linearisierten Verzerrungstensors ε (vgl. (2.28)), d.h. mit einem 4stufigem Materialtensor $\mathcal{C} = (c_{ijkl})$ gilt

$$\sigma - \mathcal{C} : \varepsilon = \mathbf{0} \quad \text{in } \Omega. \quad (3.37)$$

Zusammenfassend lässt sich das Signorini-Kontakt-Problem mit (3.31) bis (3.37) in der starken Formulierung beschreiben durch:

$$\operatorname{div} \sigma + \bar{b} = \mathbf{0} \quad \text{in } \Omega \quad (3.38a)$$

$$\sigma - \mathcal{C} : \varepsilon = \mathbf{0} \quad \text{in } \Omega \quad (3.38b)$$

$$\sigma \cdot \mathbf{n} = \bar{\mathbf{t}} \quad \text{auf } \Gamma_\sigma \quad (3.38c)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{0} \quad \text{auf } \Gamma_u \quad (3.38d)$$

$$\left. \begin{array}{l} u_n - g \leq 0 \\ \sigma_n \leq 0 \\ (u_n - g) \sigma_n = 0 \\ \sigma_t = \mathbf{0} \end{array} \right\} \text{auf } \Gamma_c \quad (3.38e)$$

An dieser Stelle sei kurz angemerkt, wie sich die Problemstellung (3.38) ändern würde, wenn wir ein Modell mit Reibung betrachten.

Bemerkung 3.20. Ein Kontaktmodell mit $\sigma_t \neq \mathbf{0}$ ist beispielsweise das Modell mit *Tresca-Reibung*. Für dieses Problem wird die letzte Bedingung aus (3.38e) durch die Bedingungen

$$\|\sigma_t\| \leq \mathcal{F}, \quad \sigma_t \mathbf{u}_t + \mathcal{F} \|\mathbf{u}_t\| = 0 \quad (3.39)$$

mit $\mathbf{u}_t := \mathbf{u} - u_n \mathbf{n}$, dem tangentialen Anteil des Verschiebungsfeldes \mathbf{u} , ersetzt. Hierbei ist $\mathcal{F} \geq 0$ eine Schranke für die Reibung. Gilt $\|\sigma_t\| < \mathcal{F}$, so folgt aus der zweiten Gleichung von (3.39), dass $\mathbf{u}_t = \mathbf{0}$ ist. Also kann $\mathbf{u}_t \neq \mathbf{0}$ nur gelten, wenn $\|\sigma_t\| = \mathcal{F}$ ist.

Mit $\mathcal{F} := \mu \sigma_n$ erhalten wir das *Reibungsgesetz von Coulomb*, wobei μ den aus der Mechanik bekannten Reibungskoeffizienten darstellt.

Da die Herleitung der zu diesem Problem äquivalenten Variationsungleichung zusätzliche mathematische Resultate erfordert, werden wir uns in der weiteren Herleitung auf das Signorini-Kontakt-Problem beziehen. Außerdem führt solch ein Problem auf eine sogenannte Variationsungleichung 2. Art, deren Lösung wir in dieser Arbeit nicht ausführen wollen.

3.2.2 Variationsformulierung des Signorini-Kontaktproblems

Erinnerung. Wegen Voraussetzung 3.18 (f) sei $\Omega \subset \mathbb{R}^2$ ein zweidimensionales Gebiet.

3. Variationsungleichungen

Wir betrachten das Signorini-Kontakt-Problem (3.38). Um hierfür eine Variationsformulierung herzuleiten, führen wir analog zu $H_0^1(\Omega)$ den Raum

$$H_{\Gamma_u}^1(\Omega) := \{\mathbf{v} \in (H^1(\Omega))^2 \mid \mathbf{v} = \mathbf{0} \text{ auf } \Gamma_u\} \quad (3.40)$$

der Funktionen, die auf dem Dirichtlet-Rand Γ_u gleich Null sind. Weiter sei analog zur Teilmenge $K \subset H_0^1(\Omega)$ die zu betrachtende Teilmenge von $H_{\Gamma_u}^1(\Omega)$ definiert durch

$$\mathcal{K} := \{\mathbf{v} \in H_{\Gamma_u}^1(\Omega) \mid v_n - g \leq 0 \text{ auf } \Gamma_c\}, \quad (3.41)$$

welche die Funktionen enthält, die die Dirichlet-Rand- und Kontaktstrandbedingungen erfüllen. Die Menge \mathcal{K} ist analog zu Lemma 3.1 konvex und abgeschlossen (vgl. auch [KO88] Kapitel 6.2 und [CSW99] Proposition 3.2).

Weiter seien $\mathbf{u}, \mathbf{v} \in \mathcal{K}$, wobei \mathbf{u} die Lösung des Signorini-Kontakt-Problems darstellt und \mathbf{v} (häufig in den Ingenieurwissenschaften als *virtuelle Verschiebung* bezeichnet) eine beliebige Testfunktion ist. Dann gilt, dass

$$\mathbf{w} = \mathbf{v} - \mathbf{u} \in (H_{\Gamma_u}^1(\Omega))^2$$

auch eine Testfunktion ist, die wir mit (3.38a) multiplizieren und über Ω integrieren. Daraus folgt

$$\begin{aligned} 0 &= \int_{\Omega} (\operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} + \bar{\mathbf{b}}) \cdot \mathbf{w} d\Omega = \int_{\Omega} \operatorname{div} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{w} + \bar{\mathbf{b}} \cdot \mathbf{w} d\Omega \\ &= \int_{\Omega} \operatorname{div}(\mathbf{w} \cdot \boldsymbol{\sigma}) - \operatorname{grad} \mathbf{w} : \boldsymbol{\sigma} + \bar{\mathbf{b}} \cdot \mathbf{w} d\Omega \\ &= \int_{\Gamma} \underbrace{\mathbf{w} \cdot \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n}}_{=\mathbf{w} \cdot \|\mathbf{n}\|^2 \cdot (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{n})} d\Gamma - \int_{\Omega} \underbrace{\frac{1}{2}(\operatorname{grad} \mathbf{w} + \operatorname{grad}^T \mathbf{w}) : \boldsymbol{\sigma}}_{=\boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{w})} d\Omega + \int_{\Omega} \bar{\mathbf{b}} \cdot \mathbf{w} d\Omega \\ &= \int_{\Gamma_c} w_n \sigma_n d\Gamma + \int_{\Gamma_{\sigma}} \bar{\mathbf{t}} \cdot \mathbf{w} d\Gamma - \int_{\Omega} \boldsymbol{\sigma} : \boldsymbol{\epsilon}(\mathbf{w}) d\Omega + \int_{\Omega} \bar{\mathbf{b}} \cdot \mathbf{w} d\Omega, \end{aligned} \quad (3.42)$$

wobei im zweiten Schritt die Produktregel für die Divergenz (C.2) und darauf folgend der Integralsatz von Gauß verwendet wurde. Weiter wurde die disjunkte Aufteilung vom Rand $\Gamma = \Gamma_u \cup \Gamma_{\sigma} \cup \Gamma_c$ benutzt, wobei $\mathbf{w} = \mathbf{0}$ auf Γ_u und $\boldsymbol{\sigma} \mathbf{n} = \bar{\mathbf{t}}$ auf Γ_{σ} gilt.

Um weiter zu einer Variationsungleichung zu gelangen, betrachten wir das Integral über Γ_c . Es gilt für den Integranden

$$\begin{aligned} w_n \sigma_n &= (v_n - u_n) \sigma_n \stackrel{+0}{=} (v_n - g + g - u_n) \sigma_n \\ &= (v_n - g) \sigma_n - \underbrace{(u_n - g) \sigma_n}_{=0 \text{ auf } \Gamma_c} \\ &= \underbrace{(v_n - g)}_{\leq 0} \underbrace{\sigma_n}_{\leq 0} \geq 0 \end{aligned}$$

3. Variationsungleichungen

Damit ist das Integral größer gleich Null und mit (3.42) folgt

$$\begin{aligned} 0 &\geq \int_{\Gamma_\sigma} \bar{\mathbf{t}} \cdot \mathbf{w} d\Gamma - \int_{\Omega} \boldsymbol{\sigma} : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{w}) d\Omega + \int_{\Omega} \bar{\mathbf{b}} \cdot \mathbf{w} d\Omega \\ \iff \int_{\Omega} \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}) : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{v} - \mathbf{u}) d\Omega &\geq \int_{\Omega} \bar{\mathbf{b}} \cdot (\mathbf{v} - \mathbf{u}) d\Omega + \int_{\Gamma_\sigma} \bar{\mathbf{t}} \cdot (\mathbf{v} - \mathbf{u}) d\Gamma \quad (3.43) \end{aligned}$$

Wegen (3.38b) steht die Spannung aus (3.43) im linearen Zusammenhang mit der Verzerrung und kann durch $\boldsymbol{\sigma} = \mathcal{C} : \boldsymbol{\varepsilon}$ ausgedrückt werden. Mit der Bilinearform $a : H_{\Gamma_u}^1 \times H_{\Gamma_u}^1 \rightarrow \mathbb{R}$ und der Linearform $F : H_{\Gamma_u}^1 \rightarrow \mathbb{R}$ mit

$$a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) := \int_{\Omega} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) : \mathcal{C} : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{v}) d\Omega, \quad (3.44a)$$

$$F(\mathbf{v}) := \int_{\Omega} \bar{\mathbf{b}} \cdot \mathbf{v} d\Omega + \int_{\Gamma_\sigma} \bar{\mathbf{t}} \cdot \mathbf{v} d\Gamma \quad (3.44b)$$

lässt sich (3.43) in der altbekannten Form schreiben: Finde $\mathbf{u} \in \mathcal{K}$, so dass

$$a(\mathbf{u}, \mathbf{v} - \mathbf{u}) \geq F(\mathbf{v} - \mathbf{u}) \quad \forall \mathbf{v} \in \mathcal{K} \quad (3.45)$$

gilt. Wir stellen folgende Voraussetzungen an den Materialtensor $\mathcal{C} = (C_{ijkl})$ (vgl. [KO88] Bedingung (5.5)).

Voraussetzung 3.21. (a) Es sei $C_{ijkl} \in L^\infty(\Omega)$. Damit gilt, dass eine Konstante M existiert, so dass

$$\max_{1 \leq i,j,k,l \leq n} \|C_{ijkl}\|_{0,\infty} \leq M \quad (3.46)$$

gilt. \mathcal{C} ist also nach oben beschränkt.

(b) Der Materialtensor \mathcal{C} ist in folgendem Sinne symmetrisch:

$$C_{ijkl}(\mathbf{x}) = C_{klji}(\mathbf{x}) = C_{jikl}(\mathbf{x}) \text{ fast überall in } \Omega. \quad (3.47)$$

(c) Es existiert eine Konstante $m > 0$, so dass fast überall in Ω

$$C_{ijkl}(\mathbf{x}) \varepsilon_{ij} \varepsilon_{kl} \geq m \varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij} \quad (3.48)$$

für jedes $\boldsymbol{\varepsilon} \in \mathbb{R}^{n \times n}$ mit $\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji}$ gilt, d.h. der Materialtensor ist nach unten beschränkt.

Notation. (a) Der Parameter n aus Voraussetzung 3.21 gibt die Dimension des Verzerrungstensors bzw. Spannungstensors an, in unserem Fall also $n = 2$.

(b) In Voraussetzung 3.21 (c) wird die *Einstein'sche Summenkonvention* verwendet. Hierbei wird über doppelt vorkommende Indizes summiert, d.h.

$$\varepsilon_{ij} \varepsilon_{ij} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \varepsilon_{ij}^2.$$

3. Variationsungleichungen

Unter den Voraussetzungen 3.21 lässt sich für die Bilinearform $a(\cdot, \cdot)$ aus (3.44a) die Stetigkeit und Koerzivität zeigen, denn:

$$\begin{aligned}
a(\mathbf{u}, \mathbf{v}) &= \int_{\Omega} \underbrace{\varepsilon(\mathbf{u}) : \mathcal{C} : \varepsilon(\mathbf{v})}_{=\varepsilon_{ij}(\mathbf{u}) C_{ijkl} \varepsilon_{kl}(\mathbf{v})} d\Omega \\
&\stackrel{(3.46)}{\leq} M \int_{\Omega} \sum_{i,j=1}^2 \varepsilon_{ij}(\mathbf{u}) \cdot \sum_{k,l=1}^2 \varepsilon_{kl}(\mathbf{v}) d\Omega \\
&\stackrel{\text{C.S.}}{\leq} M \left(\int_{\Omega} \left(\sum_{i,j=1}^2 \varepsilon_{ij}(\mathbf{u}) \right)^2 d\Omega \right)^{\frac{1}{2}} \left(\int_{\Omega} \left(\sum_{k,l=1}^2 \varepsilon_{kl}(\mathbf{v}) \right)^2 d\Omega \right)^{\frac{1}{2}} \\
&= M \left(\int_{\Omega} |\operatorname{grad} \mathbf{u}|^2 d\Omega \right)^{\frac{1}{2}} \left(\int_{\Omega} |\operatorname{grad} \mathbf{v}|^2 d\Omega \right)^{\frac{1}{2}} \\
&\leq M \|\mathbf{u}\|_1 \|\mathbf{v}\|_1,
\end{aligned}$$

wobei wir im vorletzten Schritt verwendet haben, dass

$$\sum_{i,j=1}^2 \varepsilon_{ij}(\mathbf{u}) = \sum_{i,j=1}^2 \frac{1}{2} (u_{i,j} + \underbrace{u_{j,i}}_{=\partial_i u_j}) = \sum_{i,j=1}^2 u_{i,j}$$

ist. Für die Koerzivität rechnen wir unter Verwendung von Voraussetzung 3.21 (c) nach:

$$\begin{aligned}
a(\mathbf{v}, \mathbf{v}) &= \int_{\Omega} \underbrace{\varepsilon(\mathbf{v}) : \mathcal{C} : \varepsilon(\mathbf{v})}_{=\varepsilon_{ij}(\mathbf{v}) C_{ijkl} \varepsilon_{kl}(\mathbf{v})} d\Omega \geq m \int_{\Omega} \underbrace{\varepsilon_{ij}(\mathbf{v}) \varepsilon_{ij}(\mathbf{v})}_{=\sum_{i,j=1}^2 v_{i,j}^2} d\Omega \\
&= m \int_{\Omega} |\operatorname{grad} \mathbf{v}|^2 d\Omega \stackrel{\text{Satz 2.13}}{\geq} c \|\mathbf{v}\|_1^2
\end{aligned}$$

mit einem $c > 0$. Die letzte Ungleichung folgt aus der zweiten *Korn'schen Ungleichung* (s. [Bra13] Kapitel VI, §3, Satz 3.3). Als letztes berechnen wir für die Linearform $F(\cdot)$ aus (3.44b) die Stetigkeit nach.

$$\begin{aligned}
|F(\mathbf{v})| &= \left| \int_{\Omega} \bar{\mathbf{b}} \cdot \mathbf{v} d\Omega + \int_{\Gamma_\sigma} \bar{\mathbf{t}} \cdot \mathbf{v} d\Gamma \right| \\
&\stackrel{\text{C.S.}}{\leq_{\triangle \neq}} \|\bar{\mathbf{b}}\|_0 \|\mathbf{v}\|_0 + \|\bar{\mathbf{t}}\|_{0,\Gamma_\sigma} \|\mathbf{v}\|_{0,\Gamma_\sigma} \\
&\stackrel{\text{Theorem A.9}}{\leq_{\text{Spursatz}}} c (\|\bar{\mathbf{b}}\|_0 + \|\bar{\mathbf{t}}\|_{0,\Gamma_\sigma}) \|\mathbf{v}\|_1
\end{aligned}$$

Also ist F unter der Voraussetzung, dass $\bar{\mathbf{b}} \in (L^2(\Omega))^2$ und $\bar{\mathbf{t}} \in (L^2(\Gamma_c))^2$ gilt (analog zum Modellproblem aus Kapitel 2.2), stetig. Damit folgt direkt die Aussage des nächsten Theorems.

3. Variationsungleichungen

Theorem 3.22. Es sei Voraussetzung 3.21 erfüllt sowie $\bar{\mathbf{b}} \in (L^2(\Omega))^2$ und $\bar{\mathbf{t}} \in (L^2(\Gamma_c))^2$. Dann hat die Variationsungleichung (3.43) bzw. (3.45) eine eindeutige Lösung.

Beweis. Unter den Voraussetzungen ist a eine stetige koerzive Bilinearform, sowie F stetig. Weiter ist \mathcal{K} abgeschlossen und konvex. Dann folgt aus Theorem 3.6 die Behauptung. \square

Wie schon erwähnt, gilt auch bei dieser Variationsungleichung die Äquivalenz zu einem Minimierungsproblem eines Energiefunktionalen.

Theorem 3.23. Es sei $\mathbf{v} : \Omega \rightarrow \mathbb{R}^2$ und \mathcal{K} wie oben definiert. Die Variationsungleichung (3.45) ist äquivalent zum Minimierungsproblem:

$$\min_{\mathbf{v} \in \mathcal{K}} J(\mathbf{v}) = \frac{1}{2}a(\mathbf{v}, \mathbf{v}) - F(\mathbf{v}) \quad (3.49)$$

mit der Bilinearform a aus (3.44a) und der Linearform F aus (3.44b).

Beweis. Es sei zu Beginn noch einmal bemerkt, dass \mathcal{K} konvex und abgeschlossen ist. Da a stetig und koerziv sowie F stetig ist, folgt direkt aus Lemma 2.10, dass J ein konkav-exponentielles Funktional ist. Außerdem folgt analog zum Beweis von Lemma 2.11, dass J auch Gâteaux-differenzierbar ist und damit gilt wegen Satz A.11, dass das Minimierungsproblem (3.49) und die Variationsungleichung (3.45) äquivalent sind. \square

Bemerkung 3.24. Für das Kontaktproblem mit Tresca-Reibung (s. Bemerkung 3.20) gibt es ein zu (3.49) analoges Energiefunktional. Da durch die Reibung weitere Energie entsteht, bzw. verloren geht, ist dieses Funktional auch von der Reibung abhängig. Es ergibt sich dann:

$$J(\mathbf{v}) = \frac{1}{2}a(\mathbf{v}, \mathbf{v}) + j(\mathbf{v}) - F(\mathbf{v}) \quad (3.50)$$

mit dem *Reibungsfunktional*

$$j(\mathbf{v}) := \int_{\Gamma_c} \mathcal{F} \|\mathbf{v}_t\| d\Gamma. \quad (3.51)$$

Wegen des Reibungsfunktionalen j ist (3.50) nicht mehr Gâteaux-differenzierbar. Dennoch kann man eine zur Minimierungsaufgabe über (3.50) äquivalente Variationsungleichung herleiten (vgl. [Ste12a]). Eine solche Ungleichung nennen wir Variationsungleichung 2. Art und ist von der Form

$$a(\mathbf{u}, \mathbf{v} - \mathbf{u}) + j(\mathbf{v}) - j(\mathbf{u}) \geq F(\mathbf{v} - \mathbf{u}). \quad (3.52)$$

Allerdings ist der Beweis der Existenz einer Lösung für (3.52) mit den in dieser Arbeit aufgeführten Mitteln nicht möglich, weshalb wir vom reibungsfreien Fall ausgehen.

3.2.3 Lösung des Kontaktproblems mittels FEM

Um die Variationsungleichung (3.45) mittels der Finiten-Elemente-Methode zu lösen, betrachten wir analog zu \mathcal{S}_h den Raum der mehrdimensionalen linearen Ansatzfunktionen bzgl. einer quasi-uniformen Triangulierung \mathcal{T}_h

$$\mathcal{S}_h := \{\mathbf{v} \in (C^0(\Omega))^2 \mid \mathbf{v}|_T \in \mathcal{P}_1^2 \text{ für } T \in \mathcal{T}_h, \mathbf{v}|_{\Gamma_u} = \mathbf{0}\} \subset H_{\Gamma_u}^1(\Omega). \quad (3.53)$$

Mit einer Basis $\mathcal{B}_h := \{\psi_1, \dots, \psi_{2N}\}$ von \mathcal{S}_h lässt sich dann jedes Element $\mathbf{v}_h \in \mathcal{S}_h$ als Linearkombination schreiben

$$\mathbf{v}_h(\bar{x}) = \sum_{i=1}^{2N} x_i \psi_i(\bar{x}) \quad \forall \bar{x} \in \Omega \quad (3.54)$$

für genau ein $(x_1, \dots, x_{2N})^T =: \mathbf{x} \in \mathbb{R}^{2N}$. Betrachten wir analog zu Kapitel 3.1.3 die Variationsgleichung (3.45) diskret, so erhalten wir das Problem: Finde $\mathbf{u}_h \in \mathcal{S}_h$, so dass

$$a(\mathbf{u}_h, \mathbf{v}_h - \mathbf{u}_h) \geq F(\mathbf{v}_h - \mathbf{u}_h) \quad \forall \mathbf{v}_h \in \mathcal{K}_h. \quad (3.55)$$

mit $\mathcal{K}_h := \{\mathbf{v}_h \in \mathcal{S}_h \mid \mathbf{v}_h(\bar{x}_i) \cdot \mathbf{n} - g(\bar{x}_i) \leq 0 \text{ mit } \bar{x}_i \in \mathcal{N} \cap \Gamma_c\}$, d.h. die punktuelle Form (der Nebenbedingung) von \mathcal{K} . Auch hier stellt \mathcal{N} (mit $|\mathcal{N}| = N$) wieder die Menge der Knoten dar.

Analog zu K_S aus (3.13) können wir auch hier bzgl. einer Basis \mathcal{B}_h die Menge \mathcal{K}_h äquivalent durch den Koordinatenvektor $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{2N}$ ausdrücken, d.h.

$$\begin{aligned} \mathcal{K}_S &:= \left\{ \mathbf{x} \in \mathbb{R}^{2N} \mid \sum_{j=1}^{2N} x_j \psi_j(\bar{x}_i) \cdot \mathbf{n}(\bar{x}_i) - g(\bar{x}_i) \leq 0 \text{ für } \bar{x}_i \in \mathcal{N} \cap \Gamma_c \right\} \\ &= \{\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{2N} \mid B\mathbf{x} \geq \mathbf{c}\} \\ \text{mit } B &= [-\psi_j(\bar{x}_i) \cdot \mathbf{n}(\bar{x}_i)]_{\bar{x}_i \in \mathcal{N} \cap \Gamma_c, 1 \leq j \leq 2N}, \mathbf{c} = [-g(\bar{x}_i)]_{\bar{x}_i \in \mathcal{N} \cap \Gamma_c}. \end{aligned}$$

Damit können wir das diskrete Problem in Matrixschreibweise wieder durch Einsetzen der Linearkombination (3.54) in die Variationsungleichung (3.55) erhalten. Das Problem liest sich dann als: Finde $\mathbf{x}^* \in \mathcal{K}_S$, so dass

$$(A\mathbf{x}^* - \mathbf{b})^T(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*) \geq 0 \quad \forall \mathbf{x} \in \mathcal{K}_S, \quad (3.56)$$

wobei

$$\begin{aligned} A &= \left[\int_{\Omega} \boldsymbol{\varepsilon}(\psi_j) : \mathcal{C} : \boldsymbol{\varepsilon}(\psi_i) d\Omega \right]_{1 \leq i, j \leq 2N}, \\ \mathbf{b} &= \left[\int_{\Omega} \bar{\mathbf{b}} \cdot \psi_i d\Omega + \int_{\Gamma_{\sigma}} \bar{\mathbf{t}} \cdot \psi_i d\Gamma \right]_{1 \leq i \leq 2N} \end{aligned}$$

3. Variationsungleichungen

ist. Aus Bemerkung 3.13 folgt, dass die Variationsungleichung (3.56) äquivalent zu folgendem quadratischen Programm ist:

$$\min_{\boldsymbol{x} \in \mathbb{R}^{2N}} \frac{1}{2} \boldsymbol{x}^T \boldsymbol{A} \boldsymbol{x} - \boldsymbol{b}^T \boldsymbol{x} \quad \text{s.t. } \boldsymbol{B} \boldsymbol{x} \geq \boldsymbol{c}, \quad (3.57)$$

d.h. da wegen der Koerzivität der Bilinearform $a(\cdot, \cdot)$ das Problem (3.57) konvex ist, kann dieses wieder mithilfe des in Anhang B.2 vorgestellten gelöst werden.

Bemerkung 3.25. Wir erhalten beim Kontaktproblem im Vergleich zum Hindernisproblem doppelt so große Vektoren \boldsymbol{x} , \boldsymbol{b} bzw. eine doppelt so große Matrix \boldsymbol{A} , da wir an jedem der N Knoten ein Verschiebungsfeld, d.h. eine Verschiebung in x - und y -Richtung, berechnen.

Kapitel 4

Ein hierarchischer Fehlerschätzer für Hindernisprobleme

Die adaptive Netzverfeinerung (s. Kapitel 2.4) ist gerade auch bei Hindernis- und Kontaktproblemen von großem Vorteil. Wie wir in Kapitel 3 gesehen haben, führt die Lösung von solchen Problemen auf quadratische Programme, die wir mit zeitaufwändigen Verfahren lösen müssen. An dieser Stelle sei bemerkt, dass man Variationsungleichungen auch mit anderen Verfahren – häufig üblich ist z.B. die *Penalty-Methode* – lösen kann, die jedoch nicht weniger aufwendig sind.

Um nun eine adaptive Verfeinerungsstrategie herleiten zu können, müssen wir zunächst einen geeigneten Fehlerschätzer für unser Modellproblem (3.1) erhalten. Dabei ist „geeignet“ in dem Sinne zu verstehen, dass der Schätzer den exakten Fehler nach oben und unten beschränkt. Weiter wollen wir mit dem Fehlerschätzer *a posteriori* nach jedem Verfeinerungsschritt den Fehler in der nächsten Verfeinerung abschätzen. Mit diesen Fragestellungen werden wir uns im vorliegenden Kapitel beschäftigen und einen ersten adaptiven Algorithmus, sowie die Übertragung auf Kontaktprobleme zeigen.

Es sei bemerkt, dass man als *a posteriori* Fehlerschätzer für Hindernisprobleme in der Literatur häufig residuale Schätzer wiederfinden kann. Wir wollen uns jedoch hier mit einem hierarchischen Fehlerschätzer beschäftigen, dessen grundlegende Idee auch schon in Kapitel 2.4.1 dargestellt wurde.

Dieses Kapitel basiert in weiten Teilen auf den Ausführungen, die in [ZVKG11] einzusehen sind.

4.1 Herleitung von einem hierarchischen a posteriori Fehlerschätzer

Bevor wir uns detailliert der Herleitung eines hierarchischen a posteriori Fehlerschätzers widmen, wollen wir eine Generalvoraussetzung für das gesamte Kapitel 4 stellen.

Voraussetzung 4.1. Das Hindernis wird durch eine stückweise lineare, stetige Funktion ψ beschrieben.

Für nichtstetige oder auch glatte Hindernisse sind analoge Aussagen beweisbar, die jedoch allgemeineres Vorgehen erfordern und damit schwieriger zu zeigen sind. Für einen residualen Schätzer kann man das Vorgehen für glatte Hindernisse auch in [Pag10] finden.

4.1.1 Diskretisierung des Defektproblems

Es sei \mathcal{B}_h eine nodale Basis bzgl. einer quasi-uniformen Triangulierung \mathcal{T}_h für \mathcal{S}_h (s. Kapitel 2.3), dem Raum der stückweise linearen Funktionen über \mathcal{T}_h . Weiter sei K_h wie in Kapitel 3.1.3 definiert

$$K_h = \{v_h \in \mathcal{S}_h \mid v_h(p) \geq \psi(p) \forall p \in \mathcal{N} \cap \Omega\},$$

wobei \mathcal{N} wieder die Menge der Knoten von \mathcal{T}_h darstellt. Wir betrachten nun die diskrete Variationsungleichung (3.12): Finde $u_h \in K_h$ mit

$$a(u_h, v_h - u_h) \geq (f, v_h - u_h) \quad \forall v_h \in K_h$$

oder äquivalent die Minimierung des Funktionals $J(v) = \frac{1}{2}a(v, v) - (f, v)$ über K_h , d.h.

$$u_h \in K_h : \quad J(u_h) \leq J(v_h) \quad \forall v_h \in K_h. \quad (4.1)$$

Wegen Voraussetzung 4.1, dass ψ stückweise linear ist, gilt $K_h \subset K$, da die linearen Ansatzfunktionen nicht nur punktuell, sondern auch kontinuierlich die Nebenbedingung erfüllen. Damit ist (3.12) eine konforme Finite-Elemente-Methode; nichtkonforme Finite-Elemente würden z.B. durch ein nichtstetiges Hindernis erzeugt werden. Diese sollen jedoch nicht Teil dieser Arbeit sein.

Wir werden einen a posteriori Fehlerschätzer für den Fehler bzgl. der Funktionswerte der Funktionale $J(u), J(u_h)$ herleiten. Hierfür gilt

$$J(u_h) - J(u) \geq 0,$$

denn aus den beiden Minimierungsproblemen über K und K_h folgt

$$J(u) \leq J(v) \forall v \in K, \quad J(u_h) \leq J(v_h) \forall v_h \in K_h.$$

Da $K_h \subset K$ gilt, gilt insbesondere $J(u) \leq J(v_h)$ für alle $v_h \in K_h$. Setzen wir $v_h = u_h$, so folgt

$$J(u) \leq J(u_h) \iff J(u_h) - J(u) \geq 0.$$

Bemerkung 4.2. Gilt $\psi = -\infty$, d.h. ist kein Hindernis vorhanden, so folgt

$$\begin{aligned} J(u_h) - J(u) &= \frac{1}{2}a(u_h, u_h) - (f, u_h) - \left(\frac{1}{2}a(u, u) - (f, u) \right) \\ &= \frac{1}{2}a(u_h, u_h) - (f, u_h) - \frac{1}{2}a(u, u) + (f, u) \\ &\quad + \overbrace{(a(u, u - u_h) - (f, u - u_h))}^{=0} \\ &= \frac{1}{2}a(u_h, u_h) - \frac{1}{2}a(u, u) + a(u, u - u_h) \\ &= \frac{1}{2}a(u_h, u_h) - \frac{1}{2}a(u, u) + a(u, u) - a(u, u_h) \\ &= \frac{1}{2}(a(u_h, u_h) + a(u, u) - 2a(u, u_h)) \\ &= \frac{1}{2}a(u_h - u, u_h - u) = \frac{1}{2}\|u_h - u\|_E^2. \end{aligned}$$

Ist nun ein $\psi > -\infty$ gegeben, dann addieren wir im zweiten Schritt nicht mehr Null, sondern es gilt für den Term

$$a(u, u - u_h) - (f, u - u_h) \leq 0$$

und damit gilt $J(u_h) - J(u) \geq \frac{1}{2}\|u_h - u\|_E^2$, d.h. eine obere Schranke des Fehlers im Funktional schätzt auch den Fehler zwischen exakter und approximierter Lösung in der Energienorm ab.

Notation. Um im Folgenden den hierarchischen Split leichter beschreiben zu können, schreiben wir für die Galerkin-Lösung u_h die Notation $u_{\mathcal{S}}$, um auszudrücken, dass diese im linearen Ansatzraum \mathcal{S}_h liegt. Analog sind die übrigen, verwendeten Indizes zu verstehen.

Zudem werden wir für die Energienorm die Notation

$$a(v, v)^{\frac{1}{2}} = \|v\|$$

für alle $v \in H^1(\Omega)$, also ohne Index, verwenden. Auch in diesem Kapitel werden wir wieder $(u, v) = (u, v)_0$ für alle $u, v \in H^1(\Omega)$ schreiben.

Zur Herleitung des hierarchischen Fehlerschätzers führen wir die Fehlerfunktion $e = u - u_{\mathcal{S}}$ ein, die den exakten Fehler angibt. Weiter sei

$$\mathcal{I}(v) = \frac{1}{2}a(v, v) - \rho_{\mathcal{S}}(v) \text{ mit } \rho_{\mathcal{S}}(v) = (f, v) - a(u_{\mathcal{S}}, v), \quad v \in H_0^1(\Omega).$$

Bemerkung 4.3. (a) Die Linearform ρ_S stellt das Residuum der Variationsgleichung (d.h. wenn kein Hindernis vorliegt) dar.

(b) Nach dem Darstellungssatz von Riesz existiert ein $v^* \in H_0^1(\Omega)$, so dass

$$(v^*, v) = \rho_S(v) \quad \forall v \in H_0^1(\Omega)$$

ist. Wir können also v^* als Lagrange-Multiplikator bzgl. der Nebenbedingung $v \geq \psi$ interpretieren.

Damit führen wir das Defektproblem für das Hindernisproblem ein, welches der exakte Fehler e löst.

Satz 4.4 (Lösung des Defektproblems). *Mit den obigen Bezeichnungen löst die Fehlerfunktion e folgendes Defektproblem:*

$$e \in \mathcal{A} : \quad \mathcal{I}(e) \leq \mathcal{I}(v) \quad \forall v \in \mathcal{A}, \quad (4.2)$$

$$\text{wobei } \mathcal{A} := \{v \in H_0^1(\Omega) \mid v \geq \psi - u_S\} = -u_S + K.$$

Beweis. Es sei u die Lösung von (3.2) und u_S die Lösung von (4.1). Dann gilt

$$\begin{aligned} u \in K : \quad & J(u) \leq J(\tilde{v}) \quad \forall \tilde{v} \in K \\ \iff u \in K : \quad & J(u) - J(u_S) \leq J(\tilde{v}) - J(u_S) \quad \forall \tilde{v} \in K. \end{aligned} \quad (*)$$

Wir rechnen für die linke Seite nach, dass gilt

$$\begin{aligned} J(u) - J(u_S) &= \frac{1}{2}a(u, u) - (f, u) - \left(\frac{1}{2}a(u_S, u_S) - (f, u_S) \right) \\ &= \frac{1}{2}a(u, u) + \frac{1}{2}a(u_S, u_S) - a(u_S, u_S) - (f, u - u_S) \\ &= \frac{1}{2}a(u, u) + \frac{1}{2}a(u_S, u_S) - a(u_S, u) \\ &\quad - ((f, u - u_S) - a(u_S, u - u_S)) \\ &= \frac{1}{2}a(u - u_S, u - u_S) - \rho_S(u - u_S) \\ &= \frac{1}{2}a(e, e) - \rho_S(e) = \mathcal{I}(e). \end{aligned}$$

Analog gilt für die rechte Seite $J(\tilde{v}) - J(u_S) = \mathcal{I}(\tilde{v} - u_S)$. Mit $v := \tilde{v} - u_S$ gilt $v \in \mathcal{A}$ und damit ist $(*)$ äquivalent zu: Finde $e \in \mathcal{A}$, so dass

$$\mathcal{I}(e) \leq \mathcal{I}(v) \quad \forall v \in \mathcal{A}. \quad \square$$

Korollar 4.5. *Das Problem (4.2) ist äquivalent zur Variationsungleichung: Finde $e \in \mathcal{A}$ mit*

$$a(e, v - e) \geq \rho_S(v - e) \quad \forall v \in \mathcal{A}. \quad (4.3)$$

Beweis. Analog zu Lemma 3.1 lässt sich zeigen, dass \mathcal{A} abgeschlossen und konvex ist. Aus Lemma 2.10 und 2.11 folgt, dass \mathcal{I} konvex und Gâteaux-differenzierbar ist und mit Satz A.11 folgt dann die Behauptung. \square

Bemerkung. (a) Da ψ stückweise linear ist und $\psi - u_{\mathcal{S}} \leq 0$ gilt, folgt $0 \in \mathcal{A}$, d.h. das „gewünschte“ Ergebnis für den Fehler e liegt in der für das Defektproblem betrachteten Menge.

(b) Wir werden noch zeigen, dass $\rho_{\mathcal{S}}$ eine Schlüsselgröße für die a posteriori Abschätzung darstellt.

Die Herleitung des a posteriori Schätzers vollzieht sich jetzt analog zu Kapitel 2.4.1 in zwei Schritten.

- (i) Diskretisiere (4.3) bzgl. einer Erweiterung von \mathcal{S}_h (hier mit quadratischen Funktionen), so dass e hinreichend genau approximiert wird.
- (ii) Teile den neuen Raum so auf, dass (4.3) lokal in der Erweiterung exakt gelöst werden kann.

Als Erweiterung von \mathcal{S}_h betrachten wir einen Raum \mathcal{Q}_h mit $\mathcal{S}_h \subset \mathcal{Q}_h$, wobei

$$\mathcal{Q}_h := \{v \in C^0(\Omega) \mid v|_T \in \mathcal{P}_2 \text{ für } T \in \mathcal{T}_h, v|_{\partial\Omega} = 0\}$$

ist, d.h. der Raum der stückweise quadratischen Funktionen über einer quasi-uniformen Zerlegung \mathcal{T}_h . Damit definieren wir $\mathcal{N}_{\mathcal{Q}} := \mathcal{N} \cup \{x_E \mid E \in \mathcal{E}\}$, wobei \mathcal{E} somit die Menge aller Kanten ist und x_E den Mittelpunkt einer Kante E bezeichnet. Daraus ergibt sich \mathcal{A} über \mathcal{Q}_h diskret als

$$\mathcal{A}_{\mathcal{Q}} := \{v \in \mathcal{Q}_h \mid v(p) \geq \psi(p) - u_{\mathcal{S}}(p) \forall p \in \mathcal{N}_{\mathcal{Q}} \cap \Omega\} \quad (4.4)$$

und im Bezug zu (4.4) erhalten wir somit das diskrete Defektproblem

$$e_{\mathcal{Q}} \in \mathcal{A}_{\mathcal{Q}} : \quad a(e_{\mathcal{Q}}, v - e_{\mathcal{Q}}) \geq \rho_{\mathcal{S}}(v - e_{\mathcal{Q}}) \quad \forall v \in \mathcal{A}_{\mathcal{Q}}. \quad (4.5)$$

Bemerkung 4.6. Im Allgemeinen gilt hierbei nicht $\mathcal{A}_{\mathcal{Q}} \subset \mathcal{A}$. So kann man sich anschaulich eine quadratische Funktion $v_{\mathcal{Q}} \in \mathcal{A}_{\mathcal{Q}}$ vorstellen, die allerdings zwischen den übereinstimmenden Werten aufgrund ihrer Krümmung das lineare Hindernis aus \mathcal{A} durchdringt (vgl. das eindimensionale Beispiel aus Abbildung 4.1).

Als hierarchischen Split des Raumes \mathcal{Q}_h verwenden wir $\mathcal{Q}_h = \mathcal{S}_h + \mathcal{V}_h$, wobei $\mathcal{V}_h := \{\phi_E \mid E \in \mathcal{E}\}$ der Raum der quadratischen *Bubble-Funktionen* ist, die bzgl. der Eck- und Kantenmittelpunkte eines Dreiecks definiert sind durch

$$\phi_E(p) = \delta_{x_E, p} = \begin{cases} 1, & p = x_E \\ 0, & \text{sonst} \end{cases}.$$

Es stellt sich nun die Frage, ob \mathcal{Q}_h als direkte Summe der beiden Räume \mathcal{S}_h und \mathcal{V}_h geschrieben werden kann.

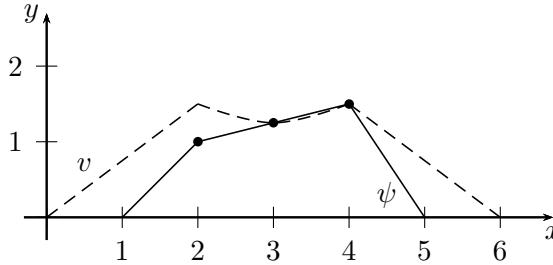


Abbildung 4.1: Beispiel eines affinen Hindernisses ψ mit $v \in \mathcal{A}_Q$ in \mathbb{R}^2

Satz 4.7. Mit den oben verwendeten Notationen gilt $\mathcal{Q}_h = \mathcal{S}_h \oplus \mathcal{V}_h$.

Beweis. Wir zeigen, dass $\mathcal{Q}_h = \mathcal{S}_h \oplus \mathcal{V}_h$ auf dem Referenzdreieck gilt und damit gilt es auch für beliebige Dreiecke $T \in \mathcal{T}_h$, da ein allgemeines Dreieck T aus dem Referenzelement \tilde{T} (vgl. Kapitel 2.3) durch affine Transformation hervorgeht.

Auf dem Referenzelement \tilde{T} ist $\{\phi_1, \phi_2, \phi_3\}$ eine Basis von \mathcal{S}_h mit

$$\phi_1(\xi, \eta) = 1 - \xi - \eta, \quad \phi_2(\xi, \eta) = \xi, \quad \phi_3(\xi, \eta) = \eta$$

und $\{\phi_4, \phi_5, \phi_6\}$ eine Basis von \mathcal{V}_h mit

$$\phi_4(\xi, \eta) = 4\xi(1 - \xi - \eta), \quad \phi_5(\xi, \eta) = 4\xi\eta, \quad \phi_6(\xi, \eta) = 4\eta(1 - \xi - \eta).$$

Damit ist $\{\phi_1, \dots, \phi_6\}$ ein Erzeugendensystem von \mathcal{Q}_h , da jedes Element

$$a_0 + a_1\xi + a_2\eta + a_3\xi^2 + a_4\xi\eta + a_5\eta^2 \in \mathcal{Q}_h$$

als Linearkombination aus den Funktionen beschrieben werden kann (ϕ_1 bis ϕ_6 enthalten alle vorkommenden Summanden eines Polynom 2. Grades). Außerdem ist leicht nachzurechnen, dass die Funktionen $\phi_i, i = 1, \dots, 6$, linear unabhängig sind und damit gilt

$$\mathcal{Q}_h = \text{span}\{\phi_1, \dots, \phi_6\}.$$

Aus der linearen Unabhängigkeit folgt somit auch $\mathcal{S}_h \cap \mathcal{V}_h = \{0\}$ und daraus die Behauptung. \square

Satz 4.7 erlaubt es uns also, jedes Element $v_Q \in \mathcal{Q}_h$ als $v_Q = v_S + v_V$ mit $v_S \in \mathcal{S}_h, v_V \in \mathcal{V}_h$ schreiben zu können. Aus diesem Grund führen wir folgende Bilinearform ein:

$$a_Q(v, w) := a(v_S, w_S) + \sum_{E \in \mathcal{E}} u_V(x_E) w_V(x_E) a(\phi_E, \phi_E) \quad \forall v, w \in \mathcal{Q}_h,$$

welche aufgrund der Eigenschaften der direkten Summe von \mathcal{S}_h und \mathcal{V}_h wohldefiniert ist. Dabei erhält man a_Q durch Entkopplung von a bzgl. der Räume

\mathcal{S}_h und \mathcal{V}_h und anschließender „Diagonalisierung“ auf \mathcal{V}_h in dem Sinne, dass wir nur noch die Koordinaten der Elemente v, w auf \mathcal{V}_h betrachten, deren Basisfunktionen ϕ_E gleich sind. Wenn wir mittels $a_{\mathcal{Q}}$ eine Matrix bzgl. der Basisfunktionen ϕ_E mit dem bekannten Muster aus dem Galerkinverfahren aufstellen, ergibt sich eine Diagonalmatrix.

Es ist legitim und sinnvoll mit der im Vergleich zur Bilinearform a einfacheren Form $a_{\mathcal{Q}}$ weiterzuarbeiten, was der folgende Satz besagt.

Satz 4.8. *Die zu $a_{\mathcal{Q}}$ assoziierte Energienorm*

$$\|v\|_{\mathcal{Q}} := a_{\mathcal{Q}}(v, v)^{\frac{1}{2}}, \quad v \in \mathcal{Q}_h$$

ist äquivalent zur Energienorm $a(\cdot, \cdot)^{\frac{1}{2}} = \|\cdot\|$, d.h. es gibt Konstanten c_1, c_2 (die insbesondere nur von der Quasi-Uniformität von \mathcal{T}_h abhängen), so dass

$$c_1 \|v\| \leq \|v\|_{\mathcal{Q}} \leq c_2 \|v\|, \quad \forall v \in \mathcal{Q}_h.$$

Beweis. Die Aussage folgt aus Theorem 4.1 bzw. Bemerkung 4.3 in [HK92] zusammen mit dem Lemma auf Seite 14 in [DLY89]. \square

Deshalb führen wir die approximierte Energie

$$\mathcal{I}_{\mathcal{Q}}(v) := \frac{1}{2}a_{\mathcal{Q}}(v, v) - \rho_{\mathcal{S}}(v), \quad v \in \mathcal{Q}_h \tag{4.6}$$

ein. Das damit verbundene Defektproblem ist allerdings noch durch die Nebenbedingung aus $\mathcal{A}_{\mathcal{Q}}$ mit \mathcal{S}_h gekoppelt und daher noch nicht alleine auf die Raumerweiterung \mathcal{V}_h bezogen. Als Abhilfe ignorieren wir einfach die linearen Beiträge in $\mathcal{A}_{\mathcal{Q}}$ und führen eine echte Teilmenge

$$\mathcal{A}_{\mathcal{V}} := \{v \in \mathcal{V}_h \mid v(x_E) \geq \psi(x_E) - u_{\mathcal{S}}(x_E) \forall E \in \mathcal{E}\} \tag{4.7}$$

von $\mathcal{A}_{\mathcal{Q}}$ ein. Zusammen mit (4.6) und (4.7) erhalten wir dann das lokale diskrete Defektproblem

$$\varepsilon_{\mathcal{V}} \in \mathcal{A}_{\mathcal{V}} : \quad \mathcal{I}_{\mathcal{Q}}(\varepsilon_{\mathcal{V}}) \leq \mathcal{I}_{\mathcal{Q}}(v) \quad \forall v \in \mathcal{A}_{\mathcal{V}} \tag{4.8}$$

bzw. die dazu äquivalente Variationsungleichung

$$\varepsilon_{\mathcal{V}} \in \mathcal{A}_{\mathcal{V}} : \quad a_{\mathcal{Q}}(\varepsilon_{\mathcal{V}}, v - \varepsilon_{\mathcal{V}}) \geq \rho_{\mathcal{S}}(v - \varepsilon_{\mathcal{V}}) \quad \forall v \in \mathcal{A}_{\mathcal{V}}. \tag{4.9}$$

Bemerkung 4.9. (a) Da ψ stetig stückweise linear ist und somit $u_{\mathcal{S}} \geq \psi$ gilt, folgt $0 \in \mathcal{A}_{\mathcal{V}}$. Damit ist auch hier die gewünschte Lösung für $\varepsilon_{\mathcal{V}}$ in $\mathcal{A}_{\mathcal{V}}$ enthalten

(b) Auch für $\mathcal{A}_{\mathcal{V}}$ lässt sich mit analogem Vorgehen zu Lemma 3.1 die Konvexität zeigen.

Lemma 4.10. Das Energiefunktional \mathcal{I}_Q ist konvex.

Beweis. Da a eine stetige, koerzive Bilinearform ist, werden aufgrund der Konstruktion von a_Q diese Eigenschaften auch auf a_Q übertragen. Weiterhin ist leicht zu überprüfen, dass ρ_S eine stetige Linearform ist. Dann folgt aus Lemma 2.10 direkt die Behauptung. \square

Das lokale diskrete Defektproblem (4.9) ist sogar exakt lösbar. Die Lösung des Problems gibt uns der nächste Satz.

Satz 4.11. Die Lösung von (4.8) bzw. (4.9) ist explizit gegeben durch

$$\varepsilon_V(x_E) = \frac{\max\{-d_E, \rho_E\}}{\|\phi_E\|} \quad (4.10)$$

wobei

$$d_E = (u_S(x_E) - \psi(x_E))\|\phi_E\| \geq 0, \quad \rho_E = \frac{\rho_S(\phi_E)}{\|\phi_E\|}. \quad (4.11)$$

Beweis. Es sei $M = |\mathcal{E}|$ die Anzahl der Kanten. Zunächst berechnen wir zur besseren Übersicht $\varepsilon_V(x_E)$ konkret, d.h.

$$\begin{aligned} \varepsilon_V(x_E) &= \frac{\max\{-d_E, \rho_E\}}{\|\phi_E\|} \\ &= \frac{\max\{(\psi(x_E) - u_S(x_E))\|\phi_E\|, \frac{\rho_S(\phi_E)}{\|\phi_E\|}\}}{\|\phi_E\|} \\ &= \max\left\{\psi(x_E) - u_S(x_E), \frac{\rho_S(\phi_E)}{\|\phi_E\|^2}\right\} \\ &= \max\left\{\psi(x_E) - u_S(x_E), \frac{1}{\|\phi_E\|^2}((f, \phi_E) - a(u_S, \phi_E))\right\}. \end{aligned} \quad (4.12)$$

Da $\varepsilon_V = \sum_{E \in \mathcal{E}} \varepsilon_V(x_E) \phi_E$ ist, können wir (4.8) bzgl. der Basis $\{\phi_E \mid E \in \mathcal{E}\}$ von \mathcal{V}_h diskret schreiben als

$$\min_{\mathbf{v} \in \mathbb{R}^M} \frac{1}{2} \mathbf{v}^T D \mathbf{v} - \mathbf{g}^T \mathbf{v} \quad \text{s.t.} \quad \mathbf{v} \geq \boldsymbol{\psi} - \mathbf{u}_S,$$

wobei $\mathbf{v} = [\varepsilon_V(x_{E_i})]_{1 \leq i \leq M}$, $D = \text{diag}(a(\phi_{E_1}, \phi_{E_1}), \dots, a(\phi_{E_M}, \phi_{E_M}))$, $\mathbf{g} = [(f, \phi_{E_i}) - a(u_S, \phi_{E_i})]_{1 \leq i \leq M}$, $\boldsymbol{\psi} = [\psi(x_{E_i})]_{1 \leq i \leq M}$ und $\mathbf{u}_S = [u_S(x_{E_i})]_{1 \leq i \leq M}$. Da \mathcal{A}_V und \mathcal{I}_Q konvex sind, existiert ein Minimum $\mathbf{v}^* \in \mathcal{A}_V$ von \mathcal{I}_Q , das die KKT-Bedingungen erfüllt. Damit gilt

$$D \mathbf{v} - \mathbf{g} - \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{0}, \quad (4.13a)$$

$$\boldsymbol{\lambda} \geq 0, \quad (4.13b)$$

$$\mathbf{v} \geq \boldsymbol{\psi} - \mathbf{u}_S, \quad (4.13c)$$

$$\lambda_i (\mathbf{v} - \boldsymbol{\psi} + \mathbf{u}_S)_i = 0 \quad \forall i = 1, \dots, M. \quad (4.13d)$$

Es sei $k \in \{1, \dots, M\}$ beliebig.

Fall 1: Gilt $\lambda_k = 0$, so folgt aus (4.13a)

$$\varepsilon_{\mathcal{V}}(x_{E_k}) = v_k = \frac{g_k}{a(\phi_{E_k}, \phi_{E_k})} = \frac{1}{\|\phi_{E_k}\|^2} ((f, \phi_{E_k}) - a(u_{\mathcal{S}}, \phi_{E_k})).$$

Fall 2: Gilt $\lambda_k \neq 0$, dann folgt wegen (4.13d)

$$\varepsilon_{\mathcal{V}}(x_{E_k}) = v_k = (\psi - u_{\mathcal{S}})_k = \psi(x_{E_k}) - u_{\mathcal{S}}(x_{E_k}).$$

Insgesamt folgt mit (4.13c) und (4.12) die Behauptung. \square

Als a posteriori Fehlerschätzer werden wir im Folgenden

$$-\mathcal{I}_{\mathcal{Q}}(\varepsilon_{\mathcal{V}}) = -\frac{1}{2}a_{\mathcal{Q}}(\varepsilon_{\mathcal{V}}, \varepsilon_{\mathcal{V}}) + \rho_{\mathcal{S}}(\varepsilon_{\mathcal{V}})$$

betrachten und zeigen, dass dieser äquivalent zum Fehler im Funktional $J(u_{\mathcal{S}}) - J(u)$ ist (vgl. Kapitel 4.1.4 und 4.1.5). Zunächst wollen wir aber eine Einführung der lokalen Anteile des Fehlerschätzers $-\mathcal{I}_{\mathcal{Q}}(\varepsilon_{\mathcal{V}})$ bieten.

4.1.2 Lokaler Anteil des Fehlerschätzers

Notation. (a) Wir schreiben im Folgenden „ \lesssim “ statt „ $\leq C$ “, wenn die Konstante C nur von der Quasi-Uniformität von \mathcal{T}_h abhängt.

(b) Weiter schreiben wir „ $A \approx B$ “ für: „ $A \lesssim B$ “ \wedge „ $B \lesssim A$ “.

Um die lokalen Anteile des Fehlerschätzers herzuleiten, zeigen wir zunächst einige Eigenschaften der Fehlerfunktion $e = u - u_{\mathcal{S}}$.

Lemma 4.12. *Die Fehlerfunktion $e = u - u_{\mathcal{S}}$ erfüllt die Ungleichungen*

$$\frac{1}{2}\|e\|^2 \leq \frac{1}{2}\rho_{\mathcal{S}}(e) \leq -\mathcal{I}(e) \leq \rho_{\mathcal{S}}(e). \quad (4.14)$$

Beweis. Wir erinnern uns, dass

$$-\mathcal{I}(e) := -\frac{1}{2} \underbrace{a(e, e)}_{\geq 0} + \rho_{\mathcal{S}}(e) \leq \rho_{\mathcal{S}}(e),$$

da a koerativ ist. Dann gilt weiter

$$\begin{aligned} -\mathcal{I}(e) &= -\frac{1}{2}a(e, e) + \rho_{\mathcal{S}}(e) \\ &= -\frac{1}{2}a(u - u_{\mathcal{S}}, e) + \rho_{\mathcal{S}}(e) \\ &= -\frac{1}{2}a(u, e) + \underbrace{\frac{1}{2}a(u_{\mathcal{S}}, e) - \frac{1}{2}(f, e)}_{=-\frac{1}{2}\rho_{\mathcal{S}}(e)} + \frac{1}{2}(f, e) + \rho_{\mathcal{S}}(e) \\ &= -\frac{1}{2} \underbrace{(a(u, u - u_{\mathcal{S}}) - (f, u - u_{\mathcal{S}}))}_{\leq 0} + \frac{1}{2}\rho_{\mathcal{S}}(e) \geq \frac{1}{2}\rho_{\mathcal{S}}(e). \end{aligned}$$

Es bleibt somit die erste Ungleichung von (4.14) zu zeigen. Wir rechnen nach, dass

$$\begin{aligned}\frac{1}{2}\rho_S(e) &= \frac{1}{2}(f, e) - \frac{1}{2}a(u_S, e) \\ &= \frac{1}{2}\underbrace{((f, u - u_S) - a(u, u - u_S))}_{\geq 0} + a(u - u_S, e) \\ &\geq \frac{1}{2}a(u - u_S, e) = \frac{1}{2}a(e, e) = \frac{1}{2}\|e\|^2\end{aligned}$$

gilt, womit (4.14) insgesamt bewiesen ist. \square

Korollar 4.13. Für die Lösungen e_Q, ε_V von (4.5) und (4.9) gilt

$$\frac{1}{2}\|e_Q\|^2 \leq \frac{1}{2}\rho_S(e_Q) \leq -\mathcal{I}(e_Q) \leq \rho_S(e_Q), \quad (4.15)$$

$$\frac{1}{2}\|\varepsilon_V\|_Q^2 \leq \frac{1}{2}\rho_S(\varepsilon_V) \leq -\mathcal{I}_Q(\varepsilon_V) \leq \rho_S(\varepsilon_V). \quad (4.16)$$

Beweis. Da e_Q und ε_V Lösungen der Variationsungleichungen (4.5) und (4.9) sind, folgt die Behauptung analog zum Beweis von Lemma 4.12. \square

Wegen (4.16) ist also $\rho_S(\varepsilon_V)$ äquivalent zum Fehlerschätzer $-\mathcal{I}_Q(\varepsilon_V)$ und kann daher als Fehlerindikator für $-\mathcal{I}_Q(\varepsilon_V)$ verwendet werden, denn wenn wir ρ_S verkleinern, so wird auch $-\mathcal{I}_Q$ kleiner. In Kapitel 4.1.4 und 4.1.5 werden wir dann die Äquivalenz von $-\mathcal{I}_Q(\varepsilon_V)$ zum exakten Fehler in den Funktionalen $J(u_S) - J(u) = -\mathcal{I}(e)$ zeigen.

Aus Lemma 4.12 folgt analog, dass der Fehler $J(u_S) - J(u)$ äquivalent zu $\rho_S(e)$ ist. Daher werden wir die lokalen Anteile des Fehlerschätzers mittels $\rho_S(\varepsilon_V)$ berechnen. Es sei u_S die Lösung von (3.12), dann gilt für alle $T \in \mathcal{T}_h$ die Gleichung $\Delta u_S = 0$, da u_S auf jedem T linear ist. Mit $\Omega = \bigcup_{T \in \mathcal{T}_h} T$ berechnen wir daher für alle $v \in H^1(\Omega)$

$$\begin{aligned}\rho_S(v) &= (f, v) - a(u_S, v) = \int_{\Omega} fv dx - \int_{\Omega} \nabla u_S \nabla v dx \\ &= \int_{\Omega} fv dx - \sum_{T \in \mathcal{T}_h} \int_T \nabla u_S \nabla v dx \\ &= \int_{\Omega} fv dx - \sum_{T \in \mathcal{T}_h} \left(\int_{\partial T} v \partial_n u_S ds - \int_T \underbrace{\Delta u_S}_= v dx \right) \\ &= \int_{\Omega} fv dx - \sum_{T \in \mathcal{T}_h} \int_{\partial T} v \partial_n u_S ds,\end{aligned} \quad (4.17)$$

wobei im vorletzten Schritt die 1. Green'sche Formel angewendet wurde und n die äußere Einheitsnormale von einem Dreieck T bezeichnet.

Betrachten wir zwei beliebige Dreiecke T_1, T_2 wie in Abbildung 4.2, wobei \mathbf{n} hierbei die Einheitsnormale, die von T_1 nach T_2 zeigt, bezeichnet, so können wir die Summe aus (4.17) bzgl. der Menge der Kanten \mathcal{E} darstellen, da der Rand $\partial T = E_1 \cup E_2 \cup E_3$ für jedes T disjunkt in seine Kantenstücke aufgeteilt werden kann.

Dabei sei E nun die Kante, die T_1 und T_2 zugleich enthalten, d.h. \mathbf{n} steht rechtwinklig auf E . Dann gilt, dass die Richtungsableitung $\partial_{\mathbf{n}} u_{\mathcal{S}}|_{T_2}$ wegen der negativen Orientierung von \mathbf{n} bzgl. T_2 negativ ist in (4.17).

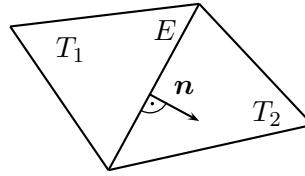


Abbildung 4.2: Dreiecke T_1 und T_2 mit Einheitsnormalen \mathbf{n}

Dies in (4.17) eingesetzt ergibt

$$\begin{aligned} \rho_{\mathcal{S}}(v) &= \int_{\Omega} fv dx - \sum_{T \in \mathcal{T}_h} \int_{\partial T} v \partial_{\mathbf{n}} u_{\mathcal{S}} ds \\ &= \int_{\Omega} fv dx - \sum_{E \in \mathcal{E}} \int_E v (\underbrace{\partial_{\mathbf{n}} u_{\mathcal{S}}|_{T_1} - \partial_{\mathbf{n}} u_{\mathcal{S}}|_{T_2}}_{=: j_E}) ds \\ &= \int_{\Omega} fv dx + \sum_{E \in \mathcal{E}} \int_E j_E v ds. \end{aligned} \quad (4.18)$$

Da für die nodalen Basisfunktionen $\{\phi_p \mid p \in \mathcal{N} \cap \Omega\}$ von \mathcal{S}_h die Partition der Eins gilt, also

$$\sum_{p \in \mathcal{N}} \phi_p = 1 \text{ auf ganz } \Omega,$$

lässt sich $\rho_{\mathcal{S}}$ wie folgt in lokale Anteile aufteilen:

$$\rho_p(v) := \rho_{\mathcal{S}}(v\phi_p), \quad v \in H^1(\Omega), p \in \mathcal{N}. \quad (4.19)$$

In Lemma 4.14 werden wir zeigen, dass wir den in (4.19) definierten lokalen Anteil von $\rho_{\mathcal{S}}$ leicht berechnen können, und mit der Aussage aus Korollar 4.15, dass sich der Fehlerindikator $\rho_{\mathcal{S}}$ auch eindeutig in die lokalen Anteile ρ_p zerlegen lässt.

Lemma 4.14. Für ρ_p gilt

$$\rho_p(v) = \int_{\omega_p} fv \phi_p dx + \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \int_E j_E v \phi_p ds, \quad v \in H^1(\Omega)$$

mit $\omega_p := \text{supp } \phi_p$ und $\mathcal{E}_p := \{E \in \mathcal{E} \mid E \ni p\}$, d.h. die Menge der Kanten, in denen p enthalten ist.

Beweis. Wir rechnen einfach mit der Definition (4.19) und (4.18) nach, dass für ein beliebiges $v \in H^1(\Omega)$ gilt

$$\begin{aligned}\rho_p(v) &= \rho_{\mathcal{S}}(v\phi_p) = \int_{\Omega} fv\phi_p \, dx + \sum_{E \in \mathcal{E}} \int_E j_E v\phi_p \, ds \\ &= \int_{\omega_p} fv\phi_p \, dx + \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \int_E j_E v\phi_p \, ds,\end{aligned}$$

da $\phi_p \equiv 0$ auf $\mathcal{O} := \overline{\Omega \setminus \omega_p}$ und damit auch auf $\mathcal{F} := \mathcal{E} \setminus \mathcal{E}_p$, da $\mathcal{F} \subset \mathcal{O}$ (vgl. Abbildung 4.3). \square

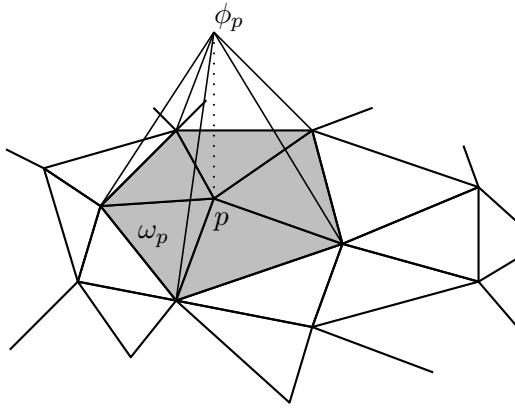


Abbildung 4.3: Darstellung von ω_p (grau) und \mathcal{E}_p (abgehende Kanten von p) für ein beliebiges ϕ_p

Korollar 4.15. *Der Indikator $\rho_{\mathcal{S}}$ lässt sich schreiben als*

$$\rho_{\mathcal{S}} = \sum_{p \in \mathcal{N}} \rho_p. \quad (4.20)$$

Beweis. Die Behauptung folgt direkt aus Lemma 4.14 zusammen mit

$$\Omega = \bigcup_{p \in \mathcal{N}} \omega_p, \quad \mathcal{E} = \bigcup_{p \in \mathcal{N}} \mathcal{E}_p \quad \text{und} \quad \sum_{p \in \mathcal{N}} \phi_p = 1$$

durch einfaches Nachrechnen. \square

Im unbeschränkten Fall gilt $\rho_{\mathcal{S}} = 0 \Leftrightarrow e = 0$, denn zu $\rho_{\mathcal{S}} = 0$ ist

$$a(e, v) = \rho_{\mathcal{S}}(v) = 0 \quad \forall v \in \mathcal{V}$$

äquivalent. Da $e \in \mathcal{V}$ ist, folgt wegen der Galerkin-Orthogonalität, dass $e = 0$ sein muss. Die Umkehrung gilt offensichtlich auch.

Wie wir schon weiter oben beschrieben haben, gilt die Galerkin-Orthogonalität bei Variationsungleichungen im Allgemeinen nicht. Aber aus Lemma 4.12 folgt allgemeiner, falls $\rho_S(v) \leq 0$ für alle $v \in \mathcal{A}$ gilt,

$$\frac{1}{2}\|e\|^2 \leq \rho_S(e) \leq 0 \implies \|e\| = 0 \implies e = 0,$$

d.h. aus $\rho_S = 0$ folgt, dass $e = 0$ ist. Man kann nun diese globale Eigenschaft auch auf die lokalen Anteile übertragen. Mit u_S als Lösung von (3.12) gilt für alle $p \in \mathcal{N} \cap \Omega$, dass $v = u_S + \phi_p \geq \psi$, d.h. $v \in K_h$. Daraus folgt mit Einsetzen von v in (3.12)

$$\begin{aligned} a(u_S, u_S + \phi_p - u_S) &\geq (f, u_S + \phi_p - u_S) \\ \iff 0 &\geq (f, \phi_p) - a(u_S, \phi_p) = \rho_S(\phi_p). \end{aligned} \quad (4.21)$$

Dies bedeutet, dass die lineare Approximation des Fehlers e gleich Null ist. Falls an einem Punkt p kein Kontakt zwischen u_S und ψ vorliegt, also $u_S(p) > \psi(p)$ ist, dann können wir ein $\alpha > 0$ hinreichend klein wählen, sodass $v = u_S - \alpha\phi_p \in K_h$ liegt. Dann folgt analog durch Einsetzen von v in (3.12)

$$\begin{aligned} 0 &\geq (f, -\alpha\phi_p) - a(u_S, -\alpha\phi_p) \\ \iff 0 &\leq (f, \phi_p) - a(u_S, \phi_p) = \rho_S(\phi_p) \stackrel{(4.21)}{\leq} 0 \end{aligned}$$

und damit gilt $\rho_S(\phi_p) = 0$. Zusammen ergeben sich die (KKT-)Bedingungen

$$\rho_S(\phi_p) \leq 0, \quad \psi(p) - u_S(p) \leq 0, \quad \rho_S(\phi_p)(\psi(p) - u_S(p)) = 0. \quad (4.22)$$

Dies berechtigt zur Definition von Kontakt- und Nichtkontaktpunkten.

Definition 4.16. Wir definieren die Mengen von *inneren Kontaktknoten* \mathcal{N}^0 und *Nichtkontaktknoten* \mathcal{N}^+ durch

$$\mathcal{N}^0 := \{p \in \mathcal{N} \cap \Omega \mid u_S(p) = \psi(p)\}, \quad \mathcal{N}^+ := \{p \in \mathcal{N} \cap \Omega \mid u_S(p) > \psi(p)\}.$$

Bemerkung 4.17. Die Bedingungen (4.22) können wir auch auf den lokalen Anteil ρ_p übertragen, da $\rho_p(1) = \rho_S(\phi_p)$ ist. Daraus ergibt sich für alle $p \in \mathcal{N} \cap \Omega$

$$\rho_p(1) \leq 0, \quad (4.23a)$$

$$u_S(p) > \psi(p) \implies \rho_p(1) = 0. \quad (4.23b)$$

Damit ist also die Approximation von e über S_h gleich Null, wenn die lokalen Anteile von ρ_S kleiner gleich Null sind.

4.1.3 Oszillationsterme

In Kapitel 4.1.4 werden wir zeigen, dass $-\mathcal{I}_Q(\varepsilon_V)$ eine obere Schranke von $-\mathcal{I}(e)$ bis auf Terme höherer Ordnung bereitstellen, d.h. Terme, die nicht in V enthalten sind. Diese sogenannten *Oszillationsterme* wollen wir daher in diesem Kapitel anschaulich einführen (ohne präzise Beweise).

Wie wir später auch in den numerischen Beispielen sehen werden, bringt eine Verkleinerung der Oszillation auch eine Verringerung des Fehlers mit sich. Daher ist es von Interesse die Oszillationsterme einfach berechnen zu können und auch mit in die adaptive Verfeinerung einzubeziehen.

Wir werden zwei Arten von Oszillationen betrachten und daher die Gesamtoszillation in zwei Anteile aufteilen.

$$\text{osc}(u_S, \psi, f) := (\text{osc}_1(u_S, \psi)^2 + \text{osc}_2(u_S, \psi, f)^2)^{\frac{1}{2}} \quad (4.24)$$

Bemerkung 4.18. In [ZVKG11] werden die Oszillationsterme (4.24) durch

$$\text{osc}(u_S, \psi, f) = \text{osc}_1(u_S, \psi) + \text{osc}_2(u_S, \psi, f)$$

eingeführt. Wir wählen in der vorliegenden Arbeit eine leicht veränderte Darstellung, da diese für die spätere Implementierung bzgl. der lokalen Anteile der Oszillationen von Vorteil ist. Außerdem ist in vielen Fällen die Menge \mathcal{N}^{0+} (s.u.) nach wenigen Verfeinerungsschritten leer, sodass $\text{osc}(u_S, \psi, f) = \text{osc}_2(u_S, \psi, f)$ in beiden beschriebenen Fällen gilt.

Im unbeschränkten Fall ist die Oszillation nur von f abhängig (vgl. [MNS00]) und daher wird dabei von „Daten-Oszillation“ gesprochen.

Der Oszillationsterm $\text{osc}_1(u_S, \psi)$ ist ein Maß für die Oszillation zwischen dem Hindernis ψ und der Galerkin-Lösung u_S , d.h.

$$\text{osc}_1(u_S, \psi) := \left(\sum_{p \in \mathcal{N}^{0+}} \|\nabla(\psi - u_S)\|_{0, \omega_p}^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

wobei $\mathcal{N}^{0+} := \{p \in \mathcal{N}^0 \mid u_S > \psi \text{ in } \omega_p \setminus \{p\}\}$ ist, also die Menge der *isolierten Kontaktknoten*, d.h. u_S ist auf der Menge ω_p nur im Punkt p mit ψ in Kontakt. Anschaulich stellt $\text{osc}_1(u_S, \psi)$ deshalb ein Maß für die Hindernisoszillation dar, weil aufgrund der Linearität von u_S und ψ folgt, dass eine größere Differenz zwischen ψ und u_S auch einen größeren Gradienten $\nabla(\psi - u_S)$ impliziert und damit auch eine größere Oszillation $\text{osc}_1(u_S, \psi)$.

Das kontinuierliche Gegenstück zu \mathcal{N}^{0+} ist die Menge der *isolierten Kontaktpunkte* x_c , die aufgrund von $u - \psi > 0$ für alle $x \in \mathcal{U}(x_c, \varepsilon) \subset \Omega$ mit $u(x_c) = \psi(x_c)$ alle strikten Minima $x_c \in \Omega$ von $u - \psi$ enthält. Daraus folgt, dass $(\nabla u - \nabla \psi) = 0$ ist für alle isolierten Kontaktpunkte, wenn u, ψ hinreichend glatt sind.

Stellt nun ψ nur eine lineare Approximation an ein hinreichend glattes Hindernis dar, so folgt mit den Aussagen aus Theorem 3.16 und Theorem 2 in [Zha07], dass wegen der Konvergenz der diskretisierten Ränder für einen isolierter Kontaktknoten $p \in \mathcal{N}^{0+}$, der bei Verfeinerung bestehen bleibt, ein für die exakte Lösung u korrespondierender Kontaktzeitpunkt \tilde{p} existiert und es gilt

$$\bigcup_{p \in \mathcal{N}^{0+}} \omega_p \xrightarrow[h \rightarrow 0]{} \tilde{p}.$$

Sind u und ψ also hinreichend glatt, so verschwindet der Oszillationsterm $\text{osc}_1(u_S, \psi)$ für $h \rightarrow 0$.

Der Oszillationsterm $\text{osc}_2(u_S, \psi, f)$ ist auf zwei Mengen definiert:

$$\mathcal{N}^{++} := \{p \in \mathcal{N}^+ \mid \rho_E \geq -d_E \forall E \in \mathcal{E}_p\}, \quad (4.25)$$

d.h. alle Knoten ohne Kontakt, in denen der Fehler ε_V nicht in Kontakt mit dem Hindernis aus \mathcal{A}_V steht (wie in Beweis von Satz 4.11 ersichtlich) und

$$\mathcal{N}^{0-} := \{p \in \mathcal{N}^0 \mid u_S = \psi, j_E \leq 0 \forall E \in \mathcal{E}_p\}, \quad (4.26)$$

d.h. die Kontaktknoten mit vollem Kontakt, sodass die Kraft f eine Drucklast ist und negativer Normalenfluß j_E herrscht (vgl. auch [SV07] Gleichung (2.11)).

Aus der Nebenbedingung von \mathcal{N}^{0-} folgt

$$0 \geq f + \sum_{E \in \mathcal{E}_p} j_E$$

Durch Multiplikation mit geeigneten Testfunktionen v und Integration über ω_p ergibt

$$\begin{aligned} 0 &\geq \int_{\omega_p} f v \, dx + \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \int_E j_E v \, ds \\ &= \int_{\omega_p} f v \, dx - \int_{\omega_p} \underbrace{\nabla u_S}_{=\nabla \psi} \nabla v \, dx \end{aligned}$$

und damit gilt

$$\int_{\omega_p} \nabla \psi \nabla v \, dx \geq \int_{\omega_p} f v \, dx. \quad (4.27)$$

Es gilt also mit (4.27) laut Satz 3.4, dass $-\Delta \psi - f \geq 0$ auf ω_p im distributionellem Sinne (vgl. auch [Wal11] Kapitel 3) ist. Dies ist laut Satz 3.4 auch notwendig, damit $u = \psi$ auf ω_p gilt.

4. Ein hierarchischer Fehlerschätzer für Hindernisprobleme

Mit den Mengen (4.25) und (4.26) ist der Oszillationsterm $\text{osc}_2(u_{\mathcal{S}}, \psi, f)$ definiert als

$$\text{osc}_2(u_{\mathcal{S}}, \psi, f) := \left(\sum_{p \in \mathcal{N}^{++}} h_p^2 \|f - \bar{f}_p\|_{0, \omega_p}^2 + \sum_{p \in \mathcal{N} \setminus (\mathcal{N}^{0-} \cup \mathcal{N}^{++})} h_p^2 \|f\|_{0, \omega_p}^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

wobei $h_p := \max_{E \in \mathcal{E}_p} |E|$ für jedes $p \in \mathcal{N}$ ein Maß für den Durchmesser von ω_p ist, und \bar{f}_p den Mittelwert von f über ω_p bezeichnet, also

$$\bar{f}_p = \frac{1}{|\omega_p|} \int_{\omega_p} f \, dx.$$

Anschaulich kann man die Summanden der ersten Summe als Varianz der Last f auf ω_p interpretieren. Da wir in der Variationsrechnung ein gemitteltes Problem betrachten, ist die erste Summe also ein Maß dafür, auf welchen Teilen von Ω die wirkliche Last f um einen gemittelten Wert oszilliert. Dies impliziert bei starker Oszillation anschaulich, dass eine Verfeinerung in solchen Gebieten, die Lösung genauer machen würde.

In der Menge $\mathcal{N} \setminus (\mathcal{N}^{0-} \cup \mathcal{N}^{++})$ sind die inneren Knoten, die keinen vollen Kontakt $u_{\mathcal{S}} = \psi$ auf ω_p haben und für die die Lösung $\varepsilon_{\mathcal{V}}$ des lokalen Defektproblems keinen Kontakt mit der Nebenbedingung von $\mathcal{A}_{\mathcal{V}}$ hat. Man beachte also, dass in $\mathcal{N} \setminus (\mathcal{N}^{0-} \cup \mathcal{N}^{++})$ nur die Kontaktknoten fehlen, die vollen Kontakt haben, und die Nichtkontaktknoten, für die $\varepsilon_{\mathcal{V}}$ in Kontakt mit dem Hindernis aus $\mathcal{A}_{\mathcal{V}}$ stehen. Diese Menge beschreibt gerade die Randpunkte am Hindernis und $\text{osc}_2(u_{\mathcal{S}}, \psi, f)$ enthält nur Anteile aus Knoten ohne vollen Kontakt, da für die Knoten mit vollem Kontakt die Varianz bzgl. des Lastvektors f irrelevant wäre, denn hier würde nach Verfeinerung immer noch voller Kontakt herrschen.

Bemerkung. Die Oszillationsterme können leicht berechnet bzw. implementiert werden, wie man in Kapitel 5 oder auch Anhang D nachvollziehen kann.

Im unbeschränkten Fall, also $\psi = -\infty$, ist $\varepsilon_{\mathcal{V}}$ nicht im Kontakt mit dem Hindernis für alle Knoten aus \mathcal{N} und damit gilt $\mathcal{N}^{++} = \mathcal{N} \cap \Omega$. Wir rechnen nach, dass dann für die Menge der Randpunkte gilt:

$$\mathcal{N} \setminus (\mathcal{N}^{0-} \cup \mathcal{N}^{++}) = \mathcal{N} \setminus (\mathcal{N} \cap \Omega) = \mathcal{N} \cap \partial\Omega.$$

Also erhalten wir für den Oszillationsterm $\text{osc}_2(u_{\mathcal{S}}, \psi, f)$ die Form

$$\text{osc}_2(u_{\mathcal{S}}, \psi, f) = \left(\sum_{p \in \mathcal{N} \cap \Omega} h_p^2 \|f - \bar{f}_p\|_{0, \omega_p}^2 + \sum_{p \in \mathcal{N} \cap \partial\Omega} h_p^2 \|f\|_{0, \omega_p}^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

was der Daten-Oszillation aus dem unbeschränkten Fall entspricht. Damit ist der zweite Oszillationsterm aus (4.24) eine Verallgemeinerung des unbeschränkten Falles. Wenn also der Teil ohne Kontakt bekannt wäre, dann

wäre der beschränkte Fall auf dieser Menge von Knoten äquivalent zu einem unbeschränkten Dirichlet-Problem.

4.1.4 Zuverlässigkeit des Fehlerschätzers

Wir werden in diesem Kapitel eine obere Schranke für den Fehler im Energiefunktional $-\mathcal{I}(e)$ herleiten, die vom hierarchischen Fehlerschätzer $-\mathcal{I}_{\mathcal{Q}}(\varepsilon_{\mathcal{V}})$ abhängt. Hierfür sind zunächst Eigenschaften für die Interpolation von e auf $\varepsilon_{\mathcal{V}}$ notwendig.

Die Reduktion des Fehlers $e = u - u_{\mathcal{S}} \in H_0^1(\Omega)$ auf den approximierten Fehler $\varepsilon_{\mathcal{V}} \in \mathcal{V}$ erhalten wir durch lokale Projektionen für jedes $p \in \mathcal{N}$ mit

$$\pi_p : H^1(\Omega) \rightarrow \mathcal{Q}_p = \text{span}\{\phi_p\} \cup \mathcal{V}_p, \quad \mathcal{V}_p = \text{span}\{\phi_E \mid E \in \mathcal{E}_p\}.$$

Die lokalen Projektionen π_p sind für jedes $v \in H^1(\Omega)$ aus Dimensionsgründen ($\dim(\mathcal{Q}_p) = |\mathcal{E}_p| + 1$) eindeutig bestimmt durch

$$\int_E \pi_p v \, ds = \int_E v \, ds \quad \forall E \in \mathcal{E}_p \text{ und } \begin{cases} \int_{\omega_p} \pi_p v \, dx = \int_{\omega_p} v \, dx & , p \in \mathcal{N}^{++} \\ 0 & , \text{sonst} \end{cases}. \quad (4.28)$$

Zunächst zeigen wir ein Resultat, das uns die Koordinaten für das Bild der lokalen Projektion π_p in einer Basis von \mathcal{Q}_p liefert.

Lemma 4.19. *Es sei π_p die oben beschriebene Projektion. Dann gelten für die Koordinaten bzgl. der Basis $\{\phi_p\} \cup \{\phi_E \mid E \in \mathcal{E}_p\}$ von*

$$\pi_p v = \alpha_p(v) \phi_p + \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \alpha_E(v) \phi_E$$

die Beziehungen

$$\alpha_p(v) = \begin{cases} \frac{c_p(v)}{c_p(\phi_p)} & , p \in \mathcal{N}^{++} \\ 0 & , \text{sonst} \end{cases}, \quad (4.29a)$$

$$\alpha_E(v) = \frac{\int_E v \, ds - \alpha_p(v) \int_E \phi_p \, ds}{\int_E \phi_E \, ds}, \quad (4.29b)$$

wobei

$$c_p(v) = \int_{\omega_p} v \, dx - \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \left(\int_E v \, ds \right) \left(\int_{\omega_p} \phi_E \, dx \right) \left(\int_E \phi_E \, ds \right)^{-1}.$$

Insbesondere gilt $c_p(\phi_p) = -\frac{1}{6} |\omega_p|$.

Beweis. Für eine bessere Übersicht im Beweis werden wir die Differentialformen dx und ds weglassen. Es sei $v \in H^1(\Omega)$ beliebig. Dann gilt für jede Kante $E \in \mathcal{E}_p$ mit

$$\pi_p v = \alpha_p(v) \phi_p + \alpha_E(v) \phi_E \in \mathcal{Q}_p$$

nach (4.28), dass

$$\begin{aligned} \int_E v &= \int_E \pi_p v = \int_E \alpha_p(v) \phi_p + \alpha_E(v) \phi_E \\ \implies \alpha_E(v) &= \left(\int_E v - \alpha_p(v) \int_E \phi_p \right) \left(\int_E \phi_E \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (4.30)$$

Wenn $p \notin \mathcal{N}^{++}$ ist, so gilt $\pi_p v \in \mathcal{V}_p = \text{span}\{\phi_E \mid E \in \mathcal{E}_p\}$, d.h. $\alpha_p(v) = 0$.

Es sei nun also $p \in \mathcal{N}^{++}$. Dann folgt aus der zweiten Eigenschaft von (4.28) und (4.30) für $\pi_p v = \alpha_p(v) \phi_p + \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \alpha_E(v) \phi_E \in \mathcal{Q}_p$

$$\begin{aligned} \int_{\omega_p} v &= \int_{\omega_p} \pi_p v = \int_{\omega_p} \alpha_p(v) \phi_p + \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \alpha_E(v) \phi_E \\ &= \alpha_p(v) \int_{\omega_p} \phi_p + \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \alpha_E(v) \int_{\omega_p} \phi_E \\ &= \alpha_p(v) \int_{\omega_p} \phi_p + \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \left(\int_E v - \alpha_p(v) \int_E \phi_p \right) \left(\int_E \phi_E \right)^{-1} \left(\int_{\omega_p} \phi_E \right) \\ &= \alpha_p(v) \underbrace{\left(\int_{\omega_p} \phi_p - \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \left(\int_E \phi_p \right) \left(\int_{\omega_p} \phi_E \right) \left(\int_E \phi_E \right)^{-1} \right)}_{=c_p(\phi_p)} \\ &\quad + \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \left(\int_E v \right) \left(\int_{\omega_p} \phi_E \right) \left(\int_E \phi_E \right)^{-1}. \end{aligned}$$

Nach dem Umformen nach $\alpha_p(v)$ ergibt sich dann

$$\alpha_p(v) = \frac{c_p(v)}{c_p(\phi_p)}$$

mit dem oben definierten $c_p(\cdot)$.

Es bleibt also zu zeigen, dass $c_p(\phi_p) = -\frac{1}{6} |\omega_p|$. Hierfür betrachten wir die einzelnen Summanden von $c_p(\phi_p)$. Zunächst wird durch das Integral von ϕ_p über ω_p das Volumen der von ϕ_p erzeugten Pyramide mit Grundfläche $|\omega_p|$ berechnet, d.h.

$$\int_{\omega_p} \phi_p = \frac{1}{3} |\omega_p|. \quad (4.31)$$

4. Ein hierarchischer Fehlerschätzer für Hindernisprobleme

Weiter ist ϕ_p auf jeder Kante $E \in \mathcal{E}_p$ eine von 1 zu 0 abfallende Gerade und damit ist das Integral über E der Flächeninhalt vom darüber liegenden Dreieck, also

$$\int_E \phi_p = \frac{1}{2} |E|. \quad (4.32)$$

Die letzten beiden Integrale berechnen wir über die Referenzelemente in \mathbb{R} oder \mathbb{R}^2 für das Kurven- bzw. Flächenintegral. Die Funktion ϕ_E über einer Kante E ist eine nach unten geöffnete Parabel. Auf dem Referenzelement $[-1, 1] \subset \mathbb{R}$ ist dies die Funktion

$$\hat{\phi}_E = 1 - \xi^2$$

und mit einer affinen Transformation $s : [-1, 1] \rightarrow [a, b] = E, s(\xi) = \frac{b-a}{2}\xi + \frac{b+a}{2}$ lässt sich das Referenzelement auf das Element E abbilden. Damit ergibt sich mit dem Transformationssatz der Integration

$$\int_E \phi_E = \frac{b-a}{2} \int_{-1}^1 \hat{\phi}_E = \frac{1}{2} |E| \cdot \frac{4}{3} = \frac{2}{3} |E|. \quad (4.33)$$

Der letzte Fall ist komplizierter zu beschreiben. Zunächst sei erwähnt, dass $\text{supp}(\phi_E) = T_i \cup T_j$ mit $T_i, T_j \subset \omega_p, i \neq j$, gilt. Es ist ϕ_E also nur auf zwei Dreiecken, die in ω_p enthalten sind, ungleich Null. Damit wird für jede Kante $E \in \mathcal{E}_p$ über jedes Dreieck $T \subset \omega_p$ genau zweimal integriert.

Auf dem Referenzelement

$$\hat{T} := \{(\xi, \eta) \in \mathbb{R}^2 \mid 0 \leq \xi \leq 1, 0 \leq \eta \leq 1 - \xi\}$$

haben wir die drei Bubble-Funktionen

$$\hat{\phi}_{E_1} = 4\xi(1 - \xi - \eta), \quad \hat{\phi}_{E_2} = 4\xi\eta, \quad \hat{\phi}_{E_3} = 4\eta(1 - \xi - \eta),$$

für die man leicht nachrechnen kann, dass

$$\int_{\hat{T}} \hat{\phi}_{E_1} = \int_{\hat{T}} \hat{\phi}_{E_2} = \int_{\hat{T}} \hat{\phi}_{E_3} = \frac{1}{6}$$

gilt. Es sei nun J_T die Jacobi-Determinante bzgl. einer affinen Transformation $r : \hat{T} \rightarrow T$, dann gilt nach Transformationssatz mit einem $T \subset \text{supp}(\phi_E)$

$$\int_T \phi_E = |J_T| \int_{\hat{T}} \hat{\phi}_E = \frac{1}{6} |J_T|.$$

Weiter rechnen wir nach, dass

$$|T| = \int_T dx = |J_T| \int_{\hat{T}} dx = \frac{1}{2} |J_T| \implies |J_T| = 2|T|$$

gilt und damit folgt insgesamt zusammen mit (4.31) bis (4.33)

$$\begin{aligned}
 c_p(\phi_p) &= \int_{\omega_p} \phi_p - \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \left(\int_E \phi_p \right) \left(\int_{\omega_p} \phi_E \right) \left(\int_E \phi_E \right)^{-1} \\
 &= \frac{1}{3} |\omega_p| - 2 \sum_{T \subset \omega_p} \frac{1}{2} |E| \cdot \frac{1}{6} |J_T| \cdot \frac{3}{2} |E|^{-1} \\
 &= \frac{1}{3} |\omega_p| - \sum_{T \subset \omega_p} \frac{1}{2} |T| = \left(\frac{1}{3} - \frac{1}{2} \right) |\omega_p| \\
 &= -\frac{1}{6} |\omega_p|. \quad \square
 \end{aligned}$$

Für das zentrale Lemma in diesem Kapitel benötigen wir noch eine Abschätzung für die Koordinaten der lokalen Projektionen.

Lemma 4.20. *Die Koeffizienten in (4.29) erfüllen die Eigenschaft*

$$\max_{Q \in \{p\} \cup \mathcal{E}_p} |\alpha_Q(v)| \lesssim h_p^{-1} (\|v\|_{0,\omega_p} + h_p \|\nabla v\|_{0,\omega_p}) \quad (4.34)$$

und π_p ist stabil im Sinne von

$$\|\pi_p v\|_{0,\omega_p} \lesssim \|v\|_{0,\omega_p} + h_p \|\nabla v\|_{0,\omega_p}. \quad (4.35)$$

Insbesondere gilt, wenn $p \notin \mathcal{N}^{++}$ ist, dass für $\alpha_E(v) = (\int_E v ds) (\int_E \phi_E)^{-1}$ die Eigenschaft gilt:

$$\int_E v ds \geq \int_E (\psi - u_S) ds \implies \alpha_E(v) \gtrsim \psi(x_E) - u_S(x_E) \quad \forall E \in \mathcal{E}_p. \quad (4.36)$$

Beweis. Unter Verwendung der Cauchy-Schwarz'schen Ungleichung und einer Anwendung vom Spursatz (s. Theorem A.9) erhalten wir zunächst

$$\begin{aligned}
 \left| \int_{\omega_p} v dx \right| &\stackrel{\text{C.S.}}{\leq} \underbrace{\left(\int_{\omega_p} dx \right)^{\frac{1}{2}}}_{=|\omega_p|^{\frac{1}{2}}} \left(\int_{\omega_p} v^2 dx \right)^{\frac{1}{2}} \lesssim h_p \|v\|_{0,\omega_p}, \\
 \left| \int_E v ds \right| &\stackrel{\text{C.S.}}{\leq} \underbrace{\left(\int_E ds \right)^{\frac{1}{2}}}_{=|E|^{\frac{1}{2}} \leq h_p^{\frac{1}{2}}} \underbrace{\left(\int_E v^2 ds \right)^{\frac{1}{2}}}_{=\|v\|_{0,E}} \stackrel{\text{Spursatz}}{\lesssim} h_p (h_p^{-1} \|v\|_{0,\omega_p} + \|\nabla v\|_{0,\omega_p}).
 \end{aligned}$$

Analog zum Beweis von Lemma 4.19 können wir für ϕ_p und ϕ_E berechnen, dass die Integrale jeweils über E sowie ω_p von den Gebieten und einer weiteren Konstanten abhängen und damit also „ $\approx h_p$ “ sind. Durch Anwendung

der Dreiecksungleichung sowie den eben erwähnten Integralen lässt sich damit berechnen, dass

$$|\alpha_p(v)| \lesssim \|v\|_{0,\omega_p} + h_p \|\nabla v\|_{0,\omega_p}$$

gilt. Dies in (4.29b) eingesetzt, ergibt dann wieder unter Verwendung der Dreiecksungleichung und der endlichen Integrale von ϕ_p, ϕ_E sowie der obigen Abschätzungen die Schranke

$$|\alpha_E(v)| \lesssim h_p^{-1} (\|v\|_{0,\omega_p} + h_p \|\nabla v\|_{0,\omega_p})$$

und damit folgt (4.34).

Die Abschätzung (4.35) folgt direkt aus den Abschätzungen von (4.34) zusammen mit der Koordinatendarstellung

$$\pi_p v = \alpha_p(v) \phi_p + \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \alpha_E(v) \phi_E$$

der lokalen Projektion und vorheriger Anwendung der Dreiecksungleichung auf die Norm $\|\pi_p v\|_{0,\omega_p}$.

Es sei $P \notin \mathcal{N}^{++}$. Dann gilt wegen (4.29a) $\alpha_p(v) = 0$ und somit mit (4.29b)

$$\alpha_E(v) = \left(\int_E v \, ds \right) \left(\int_E \phi_E \, ds \right)^{-1}.$$

Da ψ wegen Voraussetzung 4.1 stückweise linear ist, gilt dies auch für $\psi - u_S$, d.h. die Funktion stellt eine Gerade über der Kante E dar. Mit der Mittelpunktsregel der Quadratur (vgl. [Sto99] Kapitel 3) ergibt sich dann also

$$\int_E (\psi - u_S) \, ds = |E| (\psi(x_E) - u_S(x_E)).$$

Wie wir im Beweis von Lemma 4.19 nachgerechnet haben, gilt $\int_E \phi_E \, ds = \frac{2}{3}|E|$ und es ist unter der Voraussetzung von (4.36)

$$\begin{aligned} \psi(x_E) - u_S(x_E) &= \frac{3}{2}|E|^{-1} \int_E (\psi - u_S) \, ds \\ &\lesssim \left(\int_E \phi_E \, ds \right)^{-1} \left(\int_E v \, ds \right) \\ &= \alpha_E(v). \end{aligned} \quad \square$$

Jetzt haben wir das komplette Werkzeug, um das zentrale Lemma zum Beweis einer oberen Schranke für $J(u_S) - J(u)$ bzgl. $-\mathcal{I}_Q(\varepsilon_V)$ zu zeigen. Da wir gesehen haben, dass $-\mathcal{I}(e)$ äquivalent zum Fehlerindikator $\rho_S(e)$ ist, leiten wir für diesen im folgenden Lemma eine obere Schranke her.

Lemma 4.21. *Es sei Voraussetzung 4.1 erfüllt. Dann gilt*

$$\rho_S(e) \lesssim \sum_{E \in \mathcal{E}} \eta_E |\rho_E| + \text{osc}(u_S, \psi, f)^2 \quad (4.37)$$

mit ρ_E wie in (4.11), $\text{osc}(u_S, \psi, f)$ wie in (4.24) und $\eta_E = |\varepsilon_V(x_E)| \|\phi_E\|$.

Beweis. Die Idee des Beweises beruht auf Gleichung (4.20); damit können wir den Indikator in die lokalen Anteile bzgl. der Punkte $p \in \mathcal{N}$ aufteilen, d.h.

$$\rho_S(e) = \sum_{p \in \mathcal{N}} \rho_p(e). \quad (4.38)$$

Hierbei ist die Abschätzung der lokalen Anteile $\rho_p(e)$ abhängig von einer Anwendung der Poincaré-Friedrich-Ungleichung (Satz 2.13), die auf die *verallgemeinerte Poincaré-Friedrich-Ungleichung* (folgt direkt aus Satz 2.13 mit $\tilde{v} = v - c$ eingesetzt)

$$\|v - c\|_{0, \omega_p} \lesssim h_p \|\nabla v\|_{0, \omega_p} \quad (4.39)$$

mit einer Konstanten c und $v \in H^1(\Omega)$, so dass $v = c$ auf einer Menge $\Gamma \subset \partial \omega_p$ mit einem Maß $\mu(\Gamma) \neq 0$ gilt, führt. Da (4.39) von $p \in \mathcal{N}$ abhängt, werden wir sehen, dass die Anwendung von der Poincaré-Friedrich-Ungleichung vom Typ des Knotens p abhängt. Deshalb betrachten wir die disjunkte Vereinigung

$$\begin{aligned} & \overbrace{\mathcal{N}^{++} \cup (\mathcal{N}^+ \setminus \mathcal{N}^{++})}^{=\mathcal{N}^+} \cup (\mathcal{N} \cap \partial \Omega) \cup \overbrace{(\mathcal{N}^0 \setminus (\mathcal{N}^{0+} \cup \mathcal{N}^{0-}))}^{=\mathcal{N}^0} \cup \mathcal{N}^{0+} \cup \mathcal{N}^{0-} \\ &= \mathcal{N}^+ \cup \mathcal{N}^0 \cup (\mathcal{N} \cap \partial \Omega) = (\mathcal{N} \cap \Omega) \cup (\mathcal{N} \cap \partial \Omega) = \mathcal{N}. \end{aligned} \quad (4.40)$$

Wir wollen im Folgenden die in (4.40) aufgeführten Fälle chronologisch abarbeiten.

Fall 1: Es sei $p \in \mathcal{N}^{++}$. Wir behaupten, dass

$$\rho_p(e) \lesssim \left(\sum_{E \in \mathcal{E}_p^+} |\rho_E| + h_p \|f - \bar{f}_p\|_{0, \omega_p} \right) \|\nabla e\|_{0, \omega_p} \quad (4.41)$$

gilt, wobei $\mathcal{E}_p^+ = \{E \in \mathcal{E}_p \mid \rho_E \geq -d_E\}$. Da $p \in \mathcal{N}^{++}$ ist, gilt für alle $E \in \mathcal{E}_p$ die Ungleichung $\rho_E \geq -d_E$, d.h. $\mathcal{E}_P^+ = \mathcal{E}_p$. Wir setzen

$$w = (e - c)\phi_p, \quad c = \frac{1}{|\omega_p|} \int_{\omega_p} e \, dx.$$

Da $\mathcal{N}^{++} \subset (\mathcal{N}^+ \cap \Omega)$ ist, d.h. $u_S(p) > \psi(p)$ ist, gilt

$$\rho_p(c) = c \rho_p(1) \stackrel{(4.23b)}{=} c \cdot 0 = 0.$$

Damit erhalten wir

$$\begin{aligned}
 \rho_p(e) &= \rho_p(e) - \rho_p(c) = \rho_p(e - c) \stackrel{\text{Lem. 4.14}}{=} \int_{\omega_p} f w \, dx + \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \int_E j_E w \, ds \\
 &\stackrel{"+0"}{=} \int_{\omega_p} f \pi_p w \, dx + \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \underbrace{\int_E j_E \pi_p w \, ds}_{\stackrel{(4.28)}{=} \int_E j_E w \, ds} + \int_{\omega_p} f(w - \pi_p w) \, dx \\
 &= \rho_S(\pi_p w) + \int_{\omega_p} f(w - \pi_p w) \, dx - \bar{f}_p \underbrace{\int_{\omega_p} (w - \pi_p w) \, dx}_{=0 \text{ wegen (4.28)}} \\
 &= \rho_S(\pi_p w) + \int_{\omega_p} (f - \bar{f}_p)(w - \pi_p w) \, dx \\
 &\stackrel{\text{C.S.}}{\leq} \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \alpha_E(w) \rho_E \|\phi_E\| + \|f - \bar{f}_p\|_{0,\omega_p} \|w - \pi_p w\|_{0,\omega_p}, \tag{4.42}
 \end{aligned}$$

wobei im letzten Schritt zusätzlich zur Cauchy-Schwarz-Ungleichung im zweiten Summanden noch angewendet wurde, dass

$$\begin{aligned}
 \rho_S(\pi_p w) &= \rho_S \left(\alpha_p(w) \phi_p + \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \alpha_E(w) \phi_E \right) \\
 &= \alpha_p(w) \underbrace{\rho_S(\phi_p)}_{=\rho_p(1)=0} \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \alpha_E(w) \underbrace{\rho_S(\phi_E)}_{\stackrel{(4.11)}{=} \rho_E \|\phi_E\|} \\
 &= \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \alpha_E(w) \rho_E \|\phi_E\|
 \end{aligned}$$

ist. Da $\|\phi_p\|_{\infty,\omega_p} \leq 1$, gilt mit der Poincaré-Friedrich-Ungleichung (4.39)

$$\|w\|_{0,\omega_p} = \|(e - c)\phi_p\|_{0,\omega_p} \leq \|e - c\|_{0,\omega_p} \lesssim h_p \|\nabla e\|_{0,\omega_p}, \tag{4.43}$$

wobei die erste Ungleichung aus dem Mittelwertsatz der Integralrechnung folgt. Es sei weiterhin darauf hingewiesen, dass $\|\nabla \phi_p\|_{\infty,\omega_p} \lesssim h_p^{-1}$, da die Steigung der Hutfunktion nur von der Form von ω_p abhängt. Damit erhalten wir dann durch Anwenden von (4.34) für alle $E \in \mathcal{E}_p$

$$\begin{aligned}
 |\alpha_E(w)| &\lesssim h_p^{-1} (\|w\|_{0,\omega_p} + h_p \|\nabla w\|_{0,\omega_p}) \\
 &= h_p^{-1} (\|(e - c)\phi_p\|_{0,\omega_p} + h_p \|\nabla((e - c)\phi_p)\|_{0,\omega_p}) \\
 &\leq h_p^{-1} (h_p \|\nabla e\|_{0,\omega_p} + h_p \underbrace{\|\nabla(e - c)\phi_p\|_{0,\omega_p}}_{=\nabla e} + (e - c) \|\nabla \phi_p\|_{0,\omega_p}) \\
 &\stackrel{\triangleq}{\leq} \|\nabla e\|_{0,\omega_p} + \|\nabla e \phi_p\|_{0,\omega_p} + \|(e - c) \nabla \phi_p\|_{0,\omega_p} \\
 &\lesssim 2 \|\nabla e\|_{0,\omega_p} + h_p^{-1} \|e - c\|_{0,\omega_p} \stackrel{(4.43)}{\lesssim} \|\nabla e\|_{0,\omega_p}. \tag{4.44}
 \end{aligned}$$

Über das Referenzelement \tilde{T} kann man zeigen, dass

$$\|\phi_E\| = a(\phi_E, \phi_E)^{\frac{1}{2}} = \left(\int_{\Omega} \nabla \phi_E \nabla \phi_E dx \right)^{\frac{1}{2}} = \left(\frac{8}{3} (|J_{T_1}| + |J_{T_2}|) \right)^{\frac{1}{2}} \lesssim \tilde{c},$$

da die Jacobi-Determinanten J_{T_1}, J_{T_2} (wobei $E \subset T_i, i = 1, 2$ gilt) endlich sind, jedoch von der Form von ω_p abhängen. Damit gilt

$$\|\nabla e\|_{0,\omega_p} \approx \|\phi_E\|^{-1} \|\nabla e\|_{0,\omega_p}. \quad (4.45)$$

Analog folgt mit Anwendung von (4.35) und (4.43), dass gilt:

$$\begin{aligned} \|w - \pi_p w\|_{0,\omega_p} &\stackrel{\triangle \neq}{\leq} \|w\|_{0,\omega_p} + \|\pi_p w\|_{0,\omega_p} \\ &\lesssim h_p \|\nabla e\|_{0,\omega_p} + \|w\|_{0,\omega_p} + h_p \|\nabla e\|_{0,\omega_p} \lesssim h_p \|\nabla e\|_{0,\omega_p}. \end{aligned} \quad (4.46)$$

Setzen wir (4.44) bis (4.46) in (4.42), so folgt nach Ausklammern von $\|\nabla e\|_{0,\omega_p}$ die Behauptung (4.41) mit $\mathcal{E}_p = \mathcal{E}_p^+$.

Fall 2: Es sei $p \in \mathcal{N}^+ \setminus \mathcal{N}^{++}$. Wir behaupten, dass gilt:

$$\rho_p(e) \lesssim \left(\sum_{E \in \mathcal{E}_p^+} |\rho_E| + h_p \|f\|_{0,\omega_p} \right) \|\nabla e\|_{0,\omega_p}. \quad (4.47)$$

Auch hier können wir analog zu (4.42) eine Ungleichung herleiten, wobei die zweite Addition der Null nicht gilt, da $p \notin \mathcal{N}^{++}$. Damit erhalten wir die Aussage

$$\rho_p(e) \leq \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \alpha_E(w) \rho_E \|\phi_E\| + \|f\|_{0,\omega_p} \|w - \pi_p w\|_{0,\omega_p}, \quad (4.48)$$

wobei wir hier

$$w = (e - c)\phi_p, \quad c = \min \left\{ \left(\int_E e \phi_p ds \right) \left(\int_E \phi_p ds \right)^{-1} \mid E \in \mathcal{E}_p \right\} \quad (4.49)$$

setzen. Damit gilt

$$\begin{aligned} \alpha_E(w) &= \left(\int_E w ds \right) \left(\int_E \phi_E ds \right)^{-1} = \left(\int_E (e - c)\phi_p ds \right) \left(\int_E \phi_E ds \right)^{-1} \\ &= \left(\int_E e \phi_p ds - c \int_E \phi_p ds \right) \left(\int_E \phi_E ds \right)^{-1} \\ &\stackrel{(4.49)}{\geq} \frac{\int_E e \phi_p ds - (\int_E e \phi_p ds) (\int_E \phi_p ds)^{-1} (\int_E \phi_p ds)}{\int_E \phi_E ds} \\ &= 0. \end{aligned}$$

Daraus können wir folgern, dass für die Kanten $E \in \mathcal{E}_p$ mit $\rho_E < -d_E \leq 0$

$$\alpha_E(w)\rho_E \leq 0$$

gilt. Ersetzen wir dies in (4.48), so folgt (4.47) insgesamt mit denselben Abschätzungen aus (4.44), (4.45) und (4.46).

Fall 3: Sei $p \in \mathcal{N} \cap \partial\Omega$. Wir behaupten für diesen Fall, dass

$$\rho_p(e) \lesssim \sum_{E \in \mathcal{E}_p^0} d_E |\rho_E| + \left(\sum_{E \in \mathcal{E}_p^+} |\rho_E| + h_p \|f\|_{0,\omega_p} \right) \|\nabla e\|_{0,\omega_p} \quad (4.50)$$

mit $\mathcal{E}_p^0 = \mathcal{E}_p \setminus \mathcal{E}_p^+ = \{E \in \mathcal{E}_p \mid \rho_E < -d_E\}$. Auch hier betrachten wir die Ungleichung (4.48), wobei wir dieses Mal $w = e\phi_p$ setzen, d.h. mit der obigen Wahl $c = 0$ setzen. In diesem Fall kann kein anderes c gewählt werden, da wir wegen $p \notin \Omega$ nicht direkt $\rho_p(c) = 0$ aus (4.23b) folgern können. Da $p \in \partial\Omega$ ist, gilt mindestens auf einer Kante $E \in \mathcal{E}_p$ von $\partial\omega_p$

$$e = u - u_{\mathcal{S}} = 0.$$

Damit ist e auf einer Teilmenge, vom Maße ungleich Null, des Randes gleich Null und wir können daher die allgemeine Poincaré-Friedrich-Ungleichung (4.39) anwenden. Damit erhalten wir die Anteile von $E \in \mathcal{E}_p^+$ durch die Abschätzungen (4.44), (4.45) und (4.46). Um die Anteile für die Kanten $E \in \mathcal{E}_p^0$ zu erhalten, betrachten wir

$$\begin{aligned} u_{\mathcal{S}} + w &= u_{\mathcal{S}} + e\phi_p = u_{\mathcal{S}} + (u - u_{\mathcal{S}})\phi_p \\ &= \underbrace{(1 - \phi_p) u_{\mathcal{S}}}_{\in [0,1]} + \underbrace{\phi_p u}_{\in [0,1]} \\ &\geq (1 - \phi_p)\psi + \phi_p\psi = \psi. \end{aligned}$$

Da die Ungleichung punktweise gilt, folgt auch

$$\int_E w \, ds \geq \int_E \psi - u_{\mathcal{S}} \, ds \stackrel{(4.36)}{\implies} \alpha_E(w) \gtrsim \psi(x_E) - u_{\mathcal{S}}(x_E) \stackrel{(4.11)}{=} -d_E \|\phi_E\|^{-1}$$

und daher gilt $\alpha_E(w) \lesssim d_E \|\phi_E\|^{-1}$. Alle Aussagen ersetzt in (4.48) ergeben dann die Behauptung.

Fall 4: Sei $p \in \mathcal{N}^0 \setminus (\mathcal{N}^{0-} \cup \mathcal{N}^{0+})$. Wir behaupten, dass

$$\rho_p(e) \lesssim \sum_{E \in \mathcal{E}_p^0} d_E |\rho_E| + \left(\sum_{E \in \mathcal{E}_p^+} |\rho_E| + h_p \|f\|_{0,\omega_p} \right) \|\nabla e\|_{0,\omega_p} \quad (4.51)$$

gilt. Um dies zu zeigen, spalten wir den Fehler $e = e^+ + e^-$ auf mit $e^+ := \max\{e, 0\}$ und $e^- := \min\{e, 0\}$. Damit lässt sich der lokale Anteil des Indikators $\rho_{\mathcal{S}}$ schreiben als

$$\rho_p(e) = \rho_p(e^+ + e^-) = \rho_p(e^+) + \rho_p(e^-). \quad (4.52)$$

Wir betrachten zunächst $\rho_p(e^+)$ und setzen analog zum Fall 2

$$w = (e^+ - c)\phi_p, \quad c = \min \left\{ \left(\int_E e^+ \phi_p ds \right) \left(\int_E \phi_p ds \right)^{-1} \mid E \in \mathcal{E}_p \right\}. \quad (4.53)$$

Da $e^+ \geq 0$ ist, gilt auch $c \geq 0$. Wegen $\mathcal{N}^0 \setminus (\mathcal{N}^{0-} \cup \mathcal{N}^{0+}) \subset \mathcal{N} \cap \Omega$ gilt nach (4.23a) $\rho_p(1) \leq 0$, also analog zu Fall 2

$$\begin{aligned} \rho_p(e^+) &\leq \rho_p(e^+) - \underbrace{c \rho_p(1)}_{\leq 0} = \rho_p(e^+ - c) \\ &\leq \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \alpha_E(w) \rho_E \|\phi_E\| + \|f\|_{0,\omega_p} \|w - \pi_p w\|_{0,\omega_p}. \end{aligned} \quad (4.54)$$

Die Aussagen (4.53), (4.54) sind identisch zu denen aus Fall 2, wenn wir $e = e^+$ setzen. Damit folgt mit $\|\nabla e^+\|_{0,\omega_p} \leq \|\nabla e\|_{0,\omega_p}$ und denselben Argumenten wie in Fall 2, dass

$$\rho_p(e^+) \lesssim \left(\sum_{E \in \mathcal{E}_p^+} |\rho_E| + h_p \|f\|_{0,\omega_p} \right) \|\nabla e\|_{0,\omega_p}. \quad (4.55)$$

Wir betrachten nun $\rho_p(e^-)$. Analog zu Fall 3 setzen wir $w = (e^- - c)\phi_p, c = 0$ und leiten damit wieder die obere Schranke

$$\rho_p(e^-) \leq \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \alpha_E(w) \rho_E \|\phi_E\| + \|f\|_{0,\omega_p} \|w - \pi_p w\|_{0,\omega_p} \quad (4.56)$$

her. Weiter gilt punktweise

$$\begin{aligned} w &= e^- \phi_p \geq e^- = \min\{e, 0\} = \min\{u - u_S, 0\} \\ &\geq \min\{\underbrace{\psi - u_S}_{\leq 0}, 0\} = \psi - u_S \end{aligned}$$

und damit auch die Aussage über $E \in \mathcal{E}_p$ integriert; also folgt aus (4.36)

$$0 \geq \alpha_E(w) \gtrsim \psi(x_E) - u_S(x_E) = -d_E \|\phi_E\|^{-1} \quad \forall E \in \mathcal{E}_p. \quad (4.57)$$

Damit folgt speziell für alle $E \in \mathcal{E}_p^0$ die Abschätzung

$$\begin{aligned} |\alpha_E(w) \rho_E \|\phi_E\|| &= |\alpha_E(w)| |\rho_E| \|\phi_E\| \\ &\stackrel{(4.57)}{\lesssim} d_E \|\phi_E\|^{-1} |\rho_E| \|\phi_E\| = d_E |\rho_E|. \end{aligned} \quad (4.58)$$

Nun bleiben noch die oberen Schranken von $|\alpha_E(w)|$ für $E \in \mathcal{E}_p^+$ und $\|w - \pi_p w\|_{0,\omega_p}$ zu zeigen. Da $p \notin \mathcal{N}^{0+}$, also kein isolierter Knoten ist, gibt es mindestens eine Kante $E \in \mathcal{E}_p$, so dass $u_S = \psi$ gilt. Damit folgt

$$0 = \psi - u_S \leq e^- = \min\{e, 0\} \leq 0 \implies e^- = 0 \text{ auf } E.$$

Wie in Fall 3 ist damit die allgemeine Poincaré-Friedrich-Ungleichung anwendbar und wir können die Aussagen (4.44), (4.45) und (4.46) mit Anwendung von $\|\nabla e^-\|_{0,\omega_p} \leq \|\nabla e\|_{0,\omega_p}$ zeigen. Insgesamt folgt dann mit (4.58)

$$\rho_p(e^-) \lesssim \sum_{E \in \mathcal{E}_p^0} d_E |\rho_E| + \left(\sum_{E \in \mathcal{E}_p^+} |\rho_E| + h_p \|f\|_{0,\omega_p} \right) \|\nabla e\|_{0,\omega_p}. \quad (4.59)$$

Zusammen mit (4.52), (4.55) und (4.59) folgt dann die Behauptung (4.51).

Fall 5: Es sei nun $p \in \mathcal{N}^{0+}$. Wir behaupten, dass

$$\begin{aligned} \rho_p(e) &\lesssim \sum_{E \in \mathcal{E}_p^0} d_E |\rho_E| \\ &+ \left(\sum_{E \in \mathcal{E}_p^+} |\rho_E| + h_p \|f\|_{0,\omega_p} \right) (\|\nabla e\|_{0,\omega_p} + \|\nabla(\psi - u_S)\|_{0,\omega_p}) \end{aligned} \quad (4.60)$$

gilt. Wie in Fall 4 verwenden wir die Aufteilung des Indikators nach Gleichung (4.52). Mit genau demselben Vorgehen wie in Fall 4 können wir für $\rho_p(e^+)$ zeigen, dass die Abschätzung (4.55) gilt. Für $\rho_p(e^-)$ können die Aussagen (4.56) bis (4.58) wie in Fall 4 gezeigt werden. Es bleiben also auch hier noch die oberen Schranken von $|\alpha_E(w)|$ für $E \in \mathcal{E}_p^+$ und $\|w - \pi_p w\|_{0,\omega_p}$ zu zeigen.

Wir erinnern uns, dass $\psi - u_S \leq e^- \leq w \leq 0$ gilt und damit folgt

$$\begin{aligned} 0 \geq \alpha_E(w) &= \left(\int_E w \, ds \right) \left(\int_E \phi_E \, ds \right)^{-1} \\ &\geq \left(\int_E \psi - u_S \, ds \right) \left(\int_E \phi_E \, ds \right)^{-1} \\ &= \alpha_E(\psi - u_S). \end{aligned} \quad (4.61)$$

Aus (4.61) folgt

$$\begin{aligned} |\alpha_E(w)| \|\phi_E\| &\leq |\alpha_E(\psi - u_S)| \|\phi_E\| \\ &= \left| \left(\int_E \psi - u_S \, ds \right) \underbrace{\left(\int_E \phi_E \, ds \right)^{-1}}_{\lesssim h_p^{-1}} \right| \cdot \underbrace{\left(\int_{\omega_p} \nabla \phi_E \nabla \phi_E \, dx \right)^{\frac{1}{2}}}_{\lesssim h_p^{\frac{1}{2}}} \\ &\lesssim h_p^{-\frac{1}{2}} \left| \int_E \psi - u_S \, ds \right| \stackrel{\text{C.S.}}{\lesssim} h_p^{-\frac{1}{2}} \|\psi - u_S\|_{0,E} \\ &\lesssim \|\nabla(\psi - u_S)\|_{0,\omega_p}, \end{aligned} \quad (4.62)$$

wobei im letzten Schritt eine *skalierte* Version der Poincaré-Friedrich-Ungleichung¹ verwendet wurde, die darauf basiert, dass $(\psi - u_S)(p) = 0$ und $\psi - u_S$ wegen Voraussetzung 4.1 linear ist. Wegen $\psi - u_S \leq w$ folgt auch, dass

$$\|w\|_{0,\omega_p} \leq \|\psi - u_S\|_{0,\omega_p} \lesssim h_p \|\nabla(\psi - u_S)\|_{0,\omega_p}, \quad (4.63)$$

wobei in (4.63) im letzten Schritt wegen $(\psi - u_S)(p) = 0$ wieder die skalierte Version der Poincaré-Friedrich-Ungleichung verwendet wurde. Aus (4.62) folgern wir unter Verwendung der Dreiecksungleichung

$$\begin{aligned} \|\pi_p w\|_{0,\omega_p} &\leq \sum_{E \in \mathcal{E}_p} |\alpha_E(w)| \|\phi_E\|_{0,\omega_p} \\ &\lesssim \sum_{E \in \mathcal{E}_p} |\alpha_E(w)| h_p \underbrace{\|\nabla \phi_E\|_{0,\omega_p}}_{=\|\phi_E\|} \\ &\lesssim h_p \|\nabla(\psi - u_S)\|_{0,\omega_p}. \end{aligned} \quad (4.64)$$

Also folgt aus (4.63) und (4.64) insgesamt

$$\|w - \pi_p w\|_{0,\omega_p} \leq \|w\|_{0,\omega_p} + \|\pi_p w\|_{0,\omega_p} \lesssim h_p \|\nabla(\psi - u_S)\|_{0,\omega_p}. \quad (4.65)$$

Setzen wir nun für die Kanten $E \in \mathcal{E}_p^0$ die Abschätzung (4.58) und für die Kanten $E \in \mathcal{E}_p^+$ die Ungleichungen (4.62) und (4.65) in die Bedingung (4.56) ein, so erhalten wir die Aussage

$$\rho_p(e^-) \lesssim \sum_{E \in \mathcal{E}_p^0} d_E |\rho_E| + \left(\sum_{E \in \mathcal{E}_p^+} |\rho_E| + h_p \|f\|_{0,\omega_p} \right) \|\nabla(\psi - u_S)\|_{0,\omega_p}. \quad (4.66)$$

Damit folgt mit der Aufteilung (4.52) und den Abschätzungen (4.55) und (4.66) die Behauptung.

Fall 6: Es sei $p \in \mathcal{N}^{0-}$. In diesem Fall haben wir vollen Kontakt, also $u_S = \psi$ auf ω_p und daher gilt

$$e = u - u_S = u - \psi \geq 0 \text{ auf ganz } \omega_p.$$

Weiter gelten für alle $p \in \mathcal{N}^{0-}$ die Eigenschaften $f \leq 0$ auf ω_p und $j_E \leq 0$ für alle $E \in \mathcal{E}_p$. Daher rechnen wir leicht nach, dass gilt:

$$\rho_p(e) = \rho_S(e\phi_p) = \int_{\omega_p} \underbrace{fe\phi_p}_{\leq 0} dx + \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \int_E \underbrace{j_E e\phi_p}_{\leq 0} ds \leq 0. \quad (4.67)$$

¹ Anschaulich können wir uns dies folgendermaßen vorstellen: Da $\psi - u_S$ linear und am Punkt p gleich ist, ist der Gradient $\nabla(\psi - u_S) = \text{const.}$ Damit kann man mit dieser Konstanten als Höhe mit dem Mittelwertsatz der Integralrechnung die beiden Normen gegenseitig abschätzen, wobei diese Ungleichung abhängig von einer Konstanten c ist, die wiederum nur von der Form von ω_p bzw. E abhängt.

Bevor wir die sechs Fälle zusammenführen, machen wir uns klar, dass

$$\begin{aligned} & (\mathcal{N}^+ \setminus \mathcal{N}^{++}) \cup (\mathcal{N} \cap \partial\Omega) \cup \overbrace{(\mathcal{N}^0 \setminus (\mathcal{N}^{0-} \cup \mathcal{N}^{0+}))}^{=\mathcal{N}^0 \setminus \mathcal{N}^{0-}} \cup \mathcal{N}^{0+} \\ &= (\mathcal{N} \cap \Omega) \setminus (\mathcal{N}^{0-} \cup \mathcal{N}^{++}) \cup (\mathcal{N} \cap \partial\Omega) = \mathcal{N} \setminus (\mathcal{N}^{0-} \cup \mathcal{N}^{++}) \end{aligned}$$

gilt. Verwenden wir nun die sechs gezeigten Fälle, so ergibt sich:

$$\begin{aligned} \rho_{\mathcal{S}}(e) &= \sum_{p \in \mathcal{N}} \rho_p(e) \\ &= \sum_{E \in \mathcal{E}^0} d_E |\rho_E| + \sum_{p \in \mathcal{N} \setminus \mathcal{N}^{0-}} \left(\sum_{E \in \mathcal{E}_p^+} |\rho_E| \right) \|\nabla e\|_{0,\omega_p} \\ &\quad + \sum_{p \in \mathcal{N} \setminus (\mathcal{N}^{0-} \cup \mathcal{N}^{++})} h_p \|f\|_{0,\omega_p} \|\nabla e\|_{0,\omega_p} + \sum_{p \in \mathcal{N}^{++}} h_p \|f - \bar{f}_p\|_{0,\omega_p} \|\nabla e\|_{0,\omega_p} \\ &\quad + \sum_{p \in \mathcal{N}^{0+}} \left(\sum_{E \in \mathcal{E}_p^+} |\rho_E| + h_p \|f\|_{0,\omega_p} \right) \|\nabla(\psi - u_{\mathcal{S}})\|_{0,\omega_p}. \end{aligned}$$

Damit folgt nach der Cauchy-Schwarz-Ungleichung, dass mit einer Konstante $C > 0$, die nur von der Quasi-Uniformität von \mathcal{T}_h abhängt, gilt:

$$\begin{aligned} C\rho_{\mathcal{S}}(e) &\leq \sum_{E \in \mathcal{E}^0} d_E |\rho_E| + \left(\sum_{E \in \mathcal{E}^+} |\rho_E|^2 + \sum_{p \in \mathcal{N} \setminus (\mathcal{N}^{0-} \cup \mathcal{N}^{++})} h_p^2 \|f\|_{0,\omega_p}^2 \right. \\ &\quad \left. + \sum_{p \in \mathcal{N}^{++}} h_p^2 \|f - \bar{f}_p\|_{0,\omega_p}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\|\nabla e\|_{0,\Omega}^2 + \sum_{p \in \mathcal{N}^{0+}} \|\nabla(\psi - u_{\mathcal{S}})\|_{0,\omega_p}^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\ &= \sum_{E \in \mathcal{E}^0} d_E |\rho_E| \\ &\quad + \left(\sum_{E \in \mathcal{E}^+} |\rho_E|^2 + \text{osc}_2(u_{\mathcal{S}}, \psi, f)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \left(\|\nabla e\|_{0,\Omega}^2 + \text{osc}_1(u_{\mathcal{S}}, \psi)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \\ &\leq \sum_{E \in \mathcal{E}^0} d_E |\rho_E| \\ &\quad + \frac{\varepsilon}{2} \left(\sum_{E \in \mathcal{E}^+} |\rho_E|^2 + \text{osc}_2(u_{\mathcal{S}}, \psi, f)^2 \right) + \frac{1}{2\varepsilon} \left(\|\nabla e\|_{0,\Omega}^2 + \text{osc}_1(u_{\mathcal{S}}, \psi)^2 \right), \end{aligned}$$

wobei wir als letztes die Ungleichung von Young mit einem $\varepsilon > 0$ verwendet haben und

$$\mathcal{E}^0 = \bigcup_{p \in \mathcal{N}} \mathcal{E}_p^0, \quad \mathcal{E}^+ = \bigcup_{p \in \mathcal{N}} \mathcal{E}_p^+.$$

Wählen wir $\varepsilon \leq C$, so ergibt sich nach Umstellen der Ungleichung

$$\begin{aligned}
c(\varepsilon)\rho_S(e) &\leq \frac{\varepsilon}{2} \left(\sum_{E \in \mathcal{E}^+} |\rho_E|^2 + \text{osc}_2(u_S, \psi, f)^2 \right) \\
&\quad + \frac{1}{2\varepsilon} \text{osc}_1(u_S, f)^2 + \sum_{E \in \mathcal{E}^0} d_E |\rho_E| \\
&\leq \left(1 + \frac{1}{2\varepsilon} \right) \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \eta_E |\rho_E| \\
&\quad + \left(\frac{\varepsilon}{2} + \frac{1}{2\varepsilon} \right) (\text{osc}_2(u_S, \psi, f)^2 + \text{osc}_1(u_S, f)^2) \\
&\lesssim \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \eta_E |\rho_E| + \text{osc}(u_S, \psi, f)^2
\end{aligned}$$

mit $c(\varepsilon) = \varepsilon - \frac{1}{2\varepsilon}$ und η_E wie in (4.11) definiert. Damit folgt die Behauptung. \square

Mit dem Lemma 4.21 und der Äquivalenz des a posteriori Fehlerschätzers $-\mathcal{I}_Q(\varepsilon_V)$ zum Fehlerindikator $\rho_S(\varepsilon_V)$ folgt das gewünschte Resultat für unseren Fehlerschätzer im nächsten Theorem.

Theorem 4.22. *Es sei Voraussetzung 4.1 für ψ erfüllt. Dann ist der hierarchische Fehlerschätzer $-\mathcal{I}_Q(\varepsilon_V)$ eine obere Schranke für den Fehler im Energiefunktional bis auf Addition von Oszillationstermen und einer Konstante C , die nur von der Quasi-Uniformität von \mathcal{T}_h abhängt, d.h.*

$$J(u_S) - J(u) \lesssim -\mathcal{I}_Q(\varepsilon_V) + \text{osc}(u_S, \psi, f)^2. \quad (4.68)$$

Beweis. Die Aussage folgt direkt durch Lemma 4.12 und 4.21, denn

$$\begin{aligned}
J(u_S) - J(u) &= -\mathcal{I}(e) \leq \rho_S(e) \\
&\lesssim \underbrace{\sum_{E \in \mathcal{E}} \eta_E |\rho_E|}_{=\rho_S(\varepsilon_V)} + \text{osc}(u_S, \psi, f)^2 \\
&\leq 2 \cdot (-\mathcal{I}_Q(\varepsilon_V)) + \text{osc}(u_S, \psi, f)^2 \\
&\leq 2 \cdot (-\mathcal{I}_Q(\varepsilon_V) + \text{osc}(u_S, \psi, f)^2)
\end{aligned}$$

und damit folgt die Behauptung. \square

An der Abschätzung (4.68) können wir sehen, dass es sinnvoll ist, nicht nur den hierarchischen Fehlerschätzer $-\mathcal{I}_Q(\varepsilon_V)$ von einem Verfeinerungsschritt zum nächsten zu verringern, sondern auch zu fordern, dass die Oszillationsterme $\text{osc}(u_S, \psi, f)$ kleiner werden. Daher wollen wir in unserem

Algorithmus später für einen adaptiven Verfeinerungsschritt die Forderung verwenden, dass die Oszillationsterme aus (4.24) verringert werden.

Wie wir in Bemerkung 4.2 gesehen haben, gibt eine obere Schranke vom Fehler der Funktionswerte des Energiefunktionalen J auch eine obere Schranke für den exakten Fehler bzgl. der Energienorm an.

Theorem 4.23. *Es sei die Voraussetzung 4.1 für ψ erfüllt. Dann liefert die Lösung vom lokalisierten Defektproblem (4.9) eine obere Schranke für den exakten Fehler*

$$\|u - u_S\| \lesssim \left(\sum_{E \in \mathcal{E}} \eta_E |\rho_E| \right)^{\frac{1}{2}} + \text{osc}(u_S, \psi, f) \quad (4.69)$$

bis auf Oszillationsterme, wie in (4.24) definiert, und einer Konstante, die nur von der Quasi-Uniformität von \mathcal{T}_h abhängt.

Beweis. Mit Lemma 4.12 und 4.21 folgt direkt

$$\|u - u_S\|^2 \leq 2\rho_S(e) \lesssim \sum_{E \in \mathcal{E}} \eta_E |\rho_E| + \text{osc}(u_S, \psi, f)^2.$$

Nach Wurzel ziehen und Verwendung der Dreiecksungleichung folgt die Behauptung. \square

Wir wollen noch ein Resultat liefern, was die Forderung an die Verringerung der Oszillationsterme in jedem Verfeinerungsschritt begründet. Hierbei handelt es sich um ein analoges Resultat zu Lemma 3.8 aus [MNS00].

Lemma 4.24. *Es sei $0 < \gamma < 1$ ein Parameter, der die Reduktion der Größe des Dreiecks bei Verfeinerung darstellt. Weiter sei $0 < \hat{\theta} < 1$ gegeben und eine Menge an Punkten $\tilde{\mathcal{N}} \subset \mathcal{N}$, die die zu verfeinernden Dreiecke anzeigen, gegeben, so dass*

$$\text{osc}(u_S, \psi, f, \tilde{\mathcal{N}}) \geq \hat{\theta} \text{osc}(u_S, \psi, f, \mathcal{N}).$$

Dann existiert ein $\hat{\alpha} \in (0, 1)$, so dass

$$\text{osc}(u_S, \psi, f, \tilde{\mathcal{N}}) \leq \hat{\alpha} \text{osc}(u_S, \psi, f, \mathcal{N}), \quad (4.70)$$

wobei $\tilde{\mathcal{N}}$ die Menge an Punkten nach Verfeinerung der Triangulierung \mathcal{T}_h bzgl. der Punkte $\tilde{\mathcal{N}}$ ist.

Beweisskizze. Es sei $T \in \mathcal{T}_h$ ein Element, das Teilmenge von einem ω_p ist. Da

$$\bar{f}_p = \frac{1}{|\omega_p|} \int_{\omega_p} f \, dx \text{ bzw. } \bar{f}_T := \frac{1}{|T|} \int_T f \, dx$$

L^2 -Projektionen von f auf den Raum der stückweise konstanten Funktionen über ω_p bzw. T sind, gilt

$$\|f - \bar{f}_p\|_{0,\omega_p} \leq \|f - \bar{f}_T\|_{0,T}.$$

Weiter können wir auch mit einem Kontraktionsparameter $\beta > 0$ zeigen, dass gilt:

$$\|f - \bar{f}_p\|_{0,\omega_p} \geq \beta \|f - \bar{f}_T\|_{0,T}.$$

Analoge Aussagen ergeben sich für $\|f\|_{0,\omega_p}$ und $\|f\|_{0,T}$. Damit lässt sich der Oszillationsterm $\text{osc}_2(u_S, \psi, f)$ äquivalent beschreiben durch

$$\widetilde{\text{osc}}_2(u_S, \psi, f, \mathcal{T}_h) = \left(\sum_{T \in \mathcal{T}_h^1} h_T^2 \|f - \bar{f}_T\|_{0,T}^2 + \sum_{T \in \mathcal{T}_h^2} h_T^2 \|f\|_{0,T}^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

wobei $\mathcal{T}_h^i, i = 1, 2$ die Menge der Dreiecke ist, über die die Summanden des Oszillationsterms berechnet werden sollen, und h_T wie gewohnt der Radius des Dreiecks ist.

Es sei nun $\hat{\mathcal{T}}_H^i, i = 1, 2$ die zu verfeinernde Menge an gröberen Elementen. Da $h_T \leq \gamma h_{\hat{T}}$, ergibt sich

$$\begin{aligned} \widetilde{\text{osc}}_2(u_S, \psi, f, \mathcal{T}_h)^2 &= \sum_{T \in \mathcal{T}_h^1} h_T^2 \|f - \bar{f}_T\|_{0,T}^2 + \sum_{T \in \mathcal{T}_h^2} h_T^2 \|f\|_{0,T}^2 \\ &\leq \gamma^2 \left(\sum_{\hat{T} \in \hat{\mathcal{T}}_H^1} h_{\hat{T}}^2 \|f - \bar{f}_{\hat{T}}\|_{0,\hat{T}}^2 + \sum_{\hat{T} \in \hat{\mathcal{T}}_H^2} h_{\hat{T}}^2 \|f\|_{0,\hat{T}}^2 \right) \\ &\quad + \left(\sum_{T \in \mathcal{T}_H \setminus \hat{\mathcal{T}}_H^1} h_T^2 \|f - \bar{f}_T\|_{0,T}^2 + \sum_{T \in \mathcal{T}_H \setminus \hat{\mathcal{T}}_H^2} h_T^2 \|f\|_{0,T}^2 \right) \\ &\stackrel{+0''}{=} \underbrace{(\gamma^2 - 1)}_{\leq 0} \underbrace{\widetilde{\text{osc}}_2(u_S, \psi, f, \hat{\mathcal{T}}_H)^2}_{\geq 0} + \widetilde{\text{osc}}_2(u_S, \psi, f, \mathcal{T}_H)^2 \\ &\leq \tilde{\alpha} \widetilde{\text{osc}}_2(u_S, \psi, f, \mathcal{T}_H)^2. \end{aligned}$$

Eine analoge Aussage ergibt sich auch für $\widetilde{\text{osc}}_1(u_S, \psi, \mathcal{T}_h)$. Wegen der Äquivalenz der Darstellung von $\widetilde{\text{osc}}_1$ und $\widetilde{\text{osc}}_2$ zu den Oszillationstermen (4.24), folgt die Behauptung (4.70). \square

4.1.5 Effizienz des Fehlerschätzers

Der Fehlerschätzer $-\mathcal{I}_Q(\varepsilon_V)$ ist für den exakten Fehler des Energiefunktionalen auch effektiv, d.h. wir werden zeigen, dass der hierarchische Fehlerschätzer $-\mathcal{I}_Q(\varepsilon_V)$ auch eine untere Schranke für $-\mathcal{I}(e) = J(u_S) - J(u)$ ist.

Theorem 4.25. Das Hindernis ψ sei stückweise linear und stetig. Dann ist der hierarchische a posteriori Fehlerschätzer $\mathcal{I}_{\mathcal{Q}}(\varepsilon_{\mathcal{V}})$ auch eine untere Schranke für den Fehler im Energiefunktional im Sinne von

$$-\mathcal{I}_{\mathcal{Q}}(\varepsilon_{\mathcal{V}}) \leq 6(J(u_{\mathcal{S}}) - J(u)). \quad (4.71)$$

Beweis. Zunächst folgt mit (4.16)

$$\begin{aligned} -\mathcal{I}_{\mathcal{Q}}(\varepsilon_{\mathcal{V}}) &\leq \rho_{\mathcal{S}}(\varepsilon_{\mathcal{V}}) = \rho_{\mathcal{S}} \left(\sum_{E \in \mathcal{E}} \varepsilon_{\mathcal{V}}(x_E) \phi_E \right) \\ &= \sum_{E \in \mathcal{E}} \varepsilon_{\mathcal{V}}(x_E) \rho_{\mathcal{S}}(\phi_E) = \sum_{E \in \mathcal{E}} \eta_E |\rho_E| \end{aligned} \quad (4.72)$$

mit $\eta_E = |\varepsilon_{\mathcal{V}}(x_E)| \cdot \|\phi_E\|$ und $\rho_E = \frac{\rho_{\mathcal{S}}(\phi_E)}{\|\phi_E\|}$, wobei man zeigen kann, dass $\text{sign}(\varepsilon_{\mathcal{V}}(x_E)) = \text{sign}(\rho_{\mathcal{S}}(\phi_E))$ gilt. Weiter sei angemerkt, dass (4.72) äquivalent ist zu [SV07] Gleichung (2.16).

Das weitere Vorgehen ist ähnlich zum Beweis von Theorem 3.2 aus [SV07]. Es sei

$$\varphi = \frac{1}{3} \sum_{E \in \mathcal{E}} \beta_E \phi_E$$

eine Linearkombination aus Bubble-Funktionen. Dann lässt sich $u_{\mathcal{S}} + \varphi$ auf jedem $T \in \mathcal{T}_h$ durch eine Konvexitätskombination aus $v_E := u_{\mathcal{S}} + \beta_E \phi_E, E \in \mathcal{E}$ schreiben, d.h.

$$(u_{\mathcal{S}} + \varphi) \Big|_T = \frac{1}{3} \sum_{E \in \mathcal{E}, E \subset T} v_E \Big|_T.$$

Da $\mathbb{R}^2 \ni x \mapsto \frac{1}{2}|x|^2$ konvex ist, rechnen wir mit den obigen Bezeichnungen schnell nach, dass gilt

$$\begin{aligned} J(u_{\mathcal{S}} + \varphi) &= \int_{\Omega} \frac{1}{2} |\nabla(u_{\mathcal{S}} + \varphi)|^2 - f(u_{\mathcal{S}} + \varphi) dx \\ &= \sum_{T \in \mathcal{T}_h} \int_T \frac{1}{2} \left| \nabla(u_{\mathcal{S}} + \varphi) \Big|_T \right|^2 - f(u_{\mathcal{S}} + \varphi) \Big|_T dx \\ &= \sum_{T \in \mathcal{T}_h} \int_T \frac{1}{2} \left| \left(\frac{1}{3} \sum_{E \in \mathcal{E}, E \subset T} \nabla v_E \Big|_T \right) \right|^2 - f \left(\frac{1}{3} \sum_{E \in \mathcal{E}, E \subset T} v_E \Big|_T \right) dx \\ &\leq \frac{1}{3} \sum_{E \in \mathcal{E}, E \subset T} \sum_{T \in \mathcal{T}_h} \int_T \frac{1}{2} \left| \nabla v_E \Big|_T \right|^2 - f v_E \Big|_T dx. \end{aligned}$$

Da wir drei Kanten pro Dreieck T haben, gilt analog die Gleichung

$$J(u_{\mathcal{S}}) = \frac{1}{3} \sum_{E \in \mathcal{E}, E \subset T} \sum_{T \in \mathcal{T}_h} \int_T \frac{1}{2} |\nabla u_{\mathcal{S}}|^2 - f u_{\mathcal{S}} dx.$$

Durch Subtraktion der letzten beiden Terme und einigen Umformungen ergibt sich dann

$$J(u_S) - J(u_S + \varphi) \geq \frac{1}{3} \sum_{E \in \mathcal{E}} (J(u_S) - J(u_S + \beta_E \phi_E)). \quad (4.73)$$

Wir rechnen nach, dass für alle $E \in \mathcal{E}$

$$\begin{aligned} J(u_S + \beta_E \phi_E) &= \frac{1}{2} a(u_S + \beta_E \phi_E, u_S + \beta_E \phi_E) - (f, u_S + \beta_E \phi_E) \\ &= J(u_S) + \frac{1}{2} a(\beta_E \phi_E, \beta_E \phi_E) - ((f, \beta_E \phi_E) - a(u_S, \beta_E \phi_E)) \\ &= J(u_S) + \mathcal{I}(\beta_E \phi_E) \end{aligned}$$

gilt. Damit ist das Minimieren von $J(u_S + \beta_E \phi_E)$, so dass $\beta_E \geq -d_E$, mit d_E wie oben definiert, äquivalent zum Problem:

$$\min_{\beta_E \geq -d_E} \mathcal{I}(\beta_E \phi_E),$$

was den nächsten Schritt legitimiert. Wir setzen nun $\beta_E = \varepsilon_V(x_E)$, dann gilt, dass $u_S + \beta_E \phi_E \in K$ ist für alle $E \in \mathcal{E}$ und damit aufgrund der Konvexität von K auch $u_S + \varphi \in \mathcal{K}$. Damit folgt insgesamt

$$\begin{aligned} J(u_S) - J(u) &\geq J(u_S) - J(u_S + \varphi) \\ &\geq \frac{1}{3} \sum_{E \in \mathcal{E}} (J(u_S) - J(u_S + \beta_E \phi_E)) = \frac{1}{3} \sum_{E \in \mathcal{E}} -\mathcal{I}(\beta_E \phi_E) \\ &= \frac{1}{3} \sum_{E \in \mathcal{E}} \left(\rho_S(\beta_E \phi_E) - \frac{1}{2} a(\beta_E \phi_E, \beta_E \phi_E) \right) \\ &= \frac{1}{3} \sum_{E \in \mathcal{E}} \left(\beta_E \rho_S(\phi_E) - \frac{1}{2} \beta_E^2 a(\phi_E, \phi_E) \right) \\ &\geq \frac{1}{3} \sum_{E \in \mathcal{E}} \left(\frac{\max\{-d_E, \rho_E\}}{\|\phi_E\|} \rho_S(\phi_E) - \frac{1}{2} \frac{\max\{-d_E, \rho_E\}^2}{\|\phi_E\|^2} \|\phi_E\|^2 \right) \\ &= \frac{1}{3} \sum_{E \in \mathcal{E}} \left(\underbrace{\max\{-d_E, \rho_E\} \rho_E}_{=\eta_E |\rho_E|} - \frac{1}{2} \underbrace{\max\{-d_E, \rho_E\}^2}_{\geq \eta_E |\rho_E|} \right) \\ &\geq \frac{1}{3} \sum_{E \in \mathcal{E}} \frac{1}{2} \eta_E |\rho_E| = \frac{1}{6} \sum_{E \in \mathcal{E}} \eta_E |\rho_E|. \end{aligned}$$

Zusammen mit (4.72) folgt dann die Behauptung. \square

4.2 Ein adaptiver Algorithmus

Mit den Resultaten aus Kapitel 4.1 können wir nun einen implementierbaren Algorithmus für eine adaptive Verfeinerung angeben.

Mittels Theorem 4.22 bildet der hierarchische a posteriori Fehlerschätzer $-\mathcal{I}_Q(\varepsilon_V)$ eine obere Schranke für den exakten Fehler $J(u_S) - J(u)$ (und wegen Theorem 4.25 auch eine untere), d.h. dass die Verringerung unseres Schätzers auch eine Verkleinerung des Fehlers mit sich führt. Aufgrund von Korollar 4.13 ist außerdem der Fehlerschätzer $-\mathcal{I}_Q(\varepsilon_V)$ äquivalent zum Fehlerindikator $\rho_S(\varepsilon_V)$, den wir durch Lemma 4.14 in seine lokalen Anteile bzgl. der einzelnen Knoten aufteilen können.

Zuletzt bleibt noch aus, dass auch die Oszillationsterme in der oberen Schranke von Theorem 4.22 enthalten sind. Diese sollten sich also in einem Verfeinerungsschritt nicht vergrößern. Diese Forderung können wir mit Lemma 4.24 (durch möglicherweise weitere Verfeinerung) erfüllen.

Algorithm 4.1 Adaptive Verfeinerungsstrategie für ein Hindernisproblem
Gegeben sei eine Fehlerschranke $\varepsilon > 0$, Parameter $\theta_1, \theta_2 \in (0, 1)$ und ein initiales Gitter \mathcal{T}_0 . Wir setzen $\mathcal{T}_n := \mathcal{T}_0$.

- 1: Berechne die Galerkin-Lösung u_S von (3.12) über der Zerlegung \mathcal{T}_n .
- 2: Berechne die Lösung ε_V vom lokalen Defektproblem (4.9) mittels (4.10) und berechne damit $-\mathcal{I}_Q(\varepsilon_V)$.
- 3: Berechne die lokalen Anteile ρ_p des Fehlerindikators ρ_S mit Lemma 4.14 für alle $p \in \mathcal{N}$ und damit auch ρ_S mit (4.20).
- 4: Weiter berechne die Mengen $\mathcal{N}^{0+}, \mathcal{N}^{++}$ und \mathcal{N}^{0-} um die lokalen Anteile (also die einzelnen Summanden) von $\text{osc}_1(u_S, \psi)$ und $\text{osc}_2(u_S, \psi, f)$ sowie die globalen Oszillationsterme $\text{osc}(u_S, \psi, f)$ zu bestimmen.
- 5: **if** $-\mathcal{I}_Q(\varepsilon_V) < \varepsilon$ **then**
- 6: **break**
- 7: **end if**
- 8: Finde die kleinste Menge an Punkten $\hat{\mathcal{N}} \subset \mathcal{N}$, so dass gilt

$$\sum_{p \in \hat{\mathcal{N}}} \rho_p(\varepsilon_V) \geq \theta_1 \rho_S(\varepsilon_V).$$

- 9: Erweitere, falls notwendig, $\hat{\mathcal{N}}$ zu einer Menge an Punkten $\tilde{\mathcal{N}} \supset \hat{\mathcal{N}}$, so dass gilt

$$\text{osc}(u_S, \psi, f, \tilde{\mathcal{N}}) \geq \theta_2 \text{osc}(u_S, \psi, f).$$
 - 10: Bestimme aus $\tilde{\mathcal{N}}$ die angrenzenden Dreiecke $\widetilde{\mathcal{T}}_n \subset \mathcal{T}_n$.
 - 11: Erhalte die neue Triangulierung \mathcal{T}_{n+1} durch die Verfeinerung des Gitters \mathcal{T}_n über die zu verfeinernden Dreiecke $\widetilde{\mathcal{T}}_n$.
 - 12: Setze $n \leftarrow n + 1$ und Springe zu Schritt 1.
-

4.3 Erfüllung einer Saturationseigenschaft

In Kapitel 2.4, in dem wir adaptive Verfeinerungsstrategien für Variationsgleichungen beschrieben haben, musste für den hierarchischen Fehlerschätzer eine Saturationseigenschaft erfüllt werden. Dies ist hier nicht benötigt worden, dennoch wird eine solche äquivalente Eigenschaft erfüllt. Wir wollen daher in diesem Kapitel zeigen, dass das für die quadratische Finite-Element-Approximation u_Q mit

$$u_Q \in K_Q : \quad a(u_Q, v - u_Q) \geq (f, v - u_Q) \quad \forall v \in K_Q, \quad (4.74)$$

wobei $K_Q = \{v \in Q \mid v(p) \geq \psi(p) \forall p \in N_Q \cap \Omega\}$ ist, die Saturationseigenschaft

$$J(u_Q) - J(u) \leq \alpha(J(u_S) - J(u)) \quad (4.75)$$

mit $\alpha \in (0, 1)$ erfüllt, wenn die Oszillationsterme $\text{osc}(u_S, \psi, f)$ relativ klein sind. Hierfür werden wir zunächst die Äquivalenz zu einer Ungleichung abhängig von $-\mathcal{I}(e_Q)$ zeigen, um dann aufgrund der Äquivalenz von $-\mathcal{I}(e_Q)$ zum hierarchischen Fehlerschätzer das gewünschte Resultat zu erhalten.

Lemma 4.26. *Es sei $\alpha \in (0, 1)$. Dann gilt die Saturationseigenschaft (4.75) genau dann, wenn gilt:*

$$J(u_S) - J(u) \leq \frac{-\mathcal{I}(e_Q)}{1 - \alpha}. \quad (4.76)$$

Beweis. Es sei e_Q Lösung von Problem (4.5) bzw. u_Q Lösung von (4.74), damit gilt $u_Q = u_S + e_Q$. Es gilt

$$\begin{aligned} & -\mathcal{I}(e_Q) + (J(u_Q) - J(u)) \\ &= \rho_S(e_Q) - \frac{1}{2}a(e_Q, e_Q) + \frac{1}{2}a(u_Q, u_Q) - (f, u_Q) - J(u) \\ &= (f, e_Q) - a(u_S, e_Q) + a(u_S, u_Q) - \frac{1}{2}a(u_S, u_S) - (f, u_Q) - J(u) \\ &= \underbrace{\frac{1}{2}a(u_S, u_S) - (f, u_S)}_{=J(u_S)} - J(u) = J(u_S) - J(u). \end{aligned}$$

Unter der Voraussetzung, dass (4.75) gilt, folgt somit

$$\begin{aligned} J(u_S) - J(u) &= -\mathcal{I}(e_Q) + (J(u_Q) - J(u)) \\ &\leq -\mathcal{I}(e_Q) + \alpha(J(u_S) - J(u)) \end{aligned}$$

und mit Umformung nach $J(u_S) - J(u)$ folgt (4.76). Analog folgt, wenn (4.76) gilt:

$$(1 - \alpha)(J(u_S) - J(u)) \leq -\mathcal{I}(e_Q) = J(u_S) - J(u_Q)$$

und damit folgt nach leichter Umformung (4.75). \square

Lemma 4.27. Es gilt

$$\mathcal{I}(e_Q) \lesssim \mathcal{I}_Q(\varepsilon_Q) \leq \mathcal{I}_Q(\varepsilon_V) \leq 0. \quad (4.77)$$

Beweis. Es bezeichne ε_Q die Lösung des Minimierungsproblems: Finde $\varepsilon_Q \in \mathcal{A}_Q$, so dass

$$\mathcal{I}_Q(\varepsilon_Q) \leq \mathcal{I}_Q(v) \quad \forall v \in \mathcal{A}_Q. \quad (4.78)$$

Weiter sei $\varepsilon_V \in \mathcal{A}_V$ die Lösung von (4.8). Da $0 \in \mathcal{A}_V \subset \mathcal{A}_Q$ liegt, folgt durch Einsetzen von ε_V in die obige Gleichung bzw. $v = 0$ in (4.8) die Behauptung

$$\mathcal{I}_Q(\varepsilon_Q) \leq \mathcal{I}_Q(\varepsilon_V) \leq 0.$$

Analog zu Lemma 4.12 bzw. Korollar 4.13 gilt auch für ε_Q die Ungleichung $-\mathcal{I}_Q(\varepsilon_Q) \leq \rho_S(\varepsilon_Q)$. Gilt nun $\rho_S(\varepsilon_Q) \lesssim \rho_S(e_Q)$, so folgt mit (4.16)

$$\mathcal{I}(e_Q) \leq -\frac{1}{2}\rho_S(e_Q) \lesssim -\rho_S(\varepsilon_Q) \leq \mathcal{I}_Q(\varepsilon_Q).$$

Es bleibt also $\rho_S(\varepsilon_Q) \lesssim \rho_S(e_Q)$ zu zeigen. Setzen wir $v = \varepsilon_Q \in \mathcal{A}_Q$ in Problem (4.5) ein und verwenden die Cauchy-Schwarz-Ungleichung, sowie die für ε_Q zu (4.15) und (4.16) analogen Aussagen, dann ergibt sich

$$\begin{aligned} \rho_S(\varepsilon_Q - e_Q) &\leq a(e_Q, \varepsilon_Q - e_Q) \stackrel{\text{C.S.}}{\leq} \|e_Q\| \|\varepsilon_Q - e_Q\| \\ &\leq \rho_S(e_Q)^{\frac{1}{2}} \|\varepsilon_Q - e_Q\|. \end{aligned} \quad (4.79)$$

Da $e_Q, \varepsilon_Q \in \mathcal{A}_Q$ Lösungen von (4.5) bzw. (4.78) sind, folgt aus den dazugehörigen Variationsungleichungen

$$-a(e_Q, \varepsilon_Q - e_Q) \leq \rho_S(e_Q - \varepsilon_Q) \leq a_Q(\varepsilon_Q, e_Q - \varepsilon_Q). \quad (4.80)$$

Dann folgt wegen der Äquivalenz von $\|\cdot\|_Q$ und $\|\cdot\|$ (vgl. Satz 4.8), der Cauchy-Schwarz-Ungleichung und (4.80) die obere Schranke

$$\begin{aligned} \|\varepsilon_Q - e_Q\|^2 &= a(\varepsilon_Q - e_Q, \varepsilon_Q - e_Q) \\ &= a(\varepsilon_Q, \varepsilon_Q - e_Q) - a(e_Q, \varepsilon_Q - e_Q) \\ &\stackrel{(4.80)}{\leq} a(\varepsilon_Q, \varepsilon_Q - e_Q) + a_Q(\varepsilon_Q, e_Q - \varepsilon_Q) \\ &\stackrel{\text{C.S.}}{\leq} \|\varepsilon_Q\| \|\varepsilon_Q - e_Q\| + \|\varepsilon_Q\|_Q \|\varepsilon_Q - e_Q\|_Q \\ &\stackrel{\text{Satz 4.8}}{\lesssim} \|\varepsilon_Q\|_Q \|\varepsilon_Q - e_Q\|. \end{aligned}$$

Mit Division durch $\|\varepsilon_Q - e_Q\|$ erhalten wir dann

$$\|\varepsilon_Q - e_Q\| \lesssim \|\varepsilon_Q\|_Q \leq \rho_S(\varepsilon_Q)^{\frac{1}{2}},$$

wobei wir im letzten Schritt wieder für ε_Q die zu (4.15) äquivalente Aussage verwendet haben. Setzen wir dies in (4.79) ein, so erhalten wir

$$\rho_S(\varepsilon_Q - e_Q) \leq c \rho_S(e_Q)^{\frac{1}{2}} \rho_S(\varepsilon_Q)^{\frac{1}{2}} \stackrel{\text{Young}}{\leq} \frac{c^2}{2} \rho_S(e_Q) + \frac{1}{2} \rho_S(\varepsilon_Q)$$

mit einer Konstanten $C > 0$, die nur von der Quasi-Uniformität von \mathcal{T}_h abhängt. Nach Anwendung der Linearität von ρ_S auf der linken Seite und Umformung nach $\rho_S(\varepsilon_Q)$ folgt die Behauptung durch

$$\rho_S(\varepsilon_Q) \leq (2 + c^2) \rho_S(e_Q) \lesssim \rho_S(e_Q). \quad \square$$

Theorem 4.28. *Es gibt Konstanten $c > 0$ und $\alpha \in (0, 1)$, die nur von der Quasi-Uniformität von \mathcal{T}_h abhängt, so dass kleine Oszillation im Sinne von*

$$\text{osc}(u_S, \psi, f)^2 \leq c(J(u_S) - J(u)) \quad (4.81)$$

die Saturationseigenschaft (4.75)

$$J(u_Q) - J(u) \leq \alpha(J(u_S) - J(u))$$

impliziert.

Beweis. Mit Theorem 4.22 und Lemma 4.27 folgt, dass es zwei Konstanten c_1, c_2 gibt, die nur von der Quasi-Uniformität von \mathcal{T}_h abhängen, so dass

$$\begin{aligned} J(u_S) - J(u) &\leq -c_1 \mathcal{I}_Q(\varepsilon_V) + c_2 \text{osc}(u_S, \psi, f)^2 \\ &\stackrel{(4.83)}{\lesssim} -c_1 \mathcal{I}(e_Q) + c_2 c (J(u_S) - J(u)). \end{aligned}$$

Wir formen die letzte Aussage nach dem Fehler im Energiefunktional um, so dass

$$J(u_S) - J(u) \lesssim \frac{-\mathcal{I}(e_Q)}{\frac{1-c_2c}{c_1}}$$

ist und damit gilt für $1 - \alpha = \frac{1-c_2c}{c_1}$, dass

$$c = \frac{1 - c_1(1 - \alpha)}{c_2}$$

sein muss. Setzen wir nun $c_1 \geq 1$, so gilt für $\alpha \in \left(\frac{c_1-1}{c_1}, 1\right) \subset (0, 1)$, damit $c > 0$ ist. Damit sind die Voraussetzungen aus Lemma 4.26 erfüllt und somit folgt die Behauptung (4.75). \square

4.4 Übertragung des Fehlerschätzers auf Kontaktprobleme

Nun wollen wir das in Kapitel 4.1 vorgestellte Konzept auf das Kontaktproblem (3.38) übertragen. Hierfür haben wir in Kapitel 3.2 schon gesehen, dass dieses äquivalent zur Variationsungleichung:

$$\mathbf{u} \in \mathcal{K} : \quad a(\mathbf{u}, \mathbf{v} - \mathbf{u}) \geq F(\mathbf{v} - \mathbf{u}) \quad \forall \mathbf{v} \in \mathcal{K}, \quad (4.82)$$

wobei \mathcal{K} die konvexe, abgeschlossene Menge aus (3.41) ist, a die stetige, koerzitive Bilinearform (3.44a) und F die stetige Linearform (3.44b).

Diskretisierung des lokalen Defektproblems

Die Diskretisierung des Defektproblems ist analog zu Kapitel 4.1.1 durchzuführen. Wir betrachten hierfür die diskretisierte Variationsungleichung (3.55):

$$\mathbf{u}_h \in \mathcal{K}_h : \quad a(\mathbf{u}_h, \mathbf{v}_h - \mathbf{u}_h) \geq F(\mathbf{v}_h - \mathbf{u}_h) \quad \forall \mathbf{v}_h \in \mathcal{K}_h. \quad (4.83)$$

mit $\mathcal{K}_h := \{\mathbf{v}_h \in \mathcal{S}_h \mid \mathbf{v}_h(\bar{x}_i) \cdot \mathbf{n} - g(\bar{x}_i) \leq 0 \text{ mit } \bar{x}_i \in \mathcal{N} \cap \Gamma_c\}$. Wie wir schon gesehen haben, existiert auch hierfür eine äquivalente Minimierungsproblem eines Energiefunktionalen:

$$\mathbf{u}_h \in \mathcal{K}_h : \quad J(\mathbf{u}_h) \leq J(\mathbf{v}_h) \quad \forall \mathbf{v}_h \in \mathcal{K}_h, \quad (4.84)$$

wobei $J(\mathbf{v}) = \frac{1}{2}a(\mathbf{v}, \mathbf{v}) - F(\mathbf{v})$ ist.

Notation. Wir wollen der Einfachheit halber auch wieder statt \mathbf{u}_h die Notation $\mathbf{u}_{\mathcal{S}}$ für $\mathbf{u}_h \in \mathcal{S}_h$ verwenden. Analog sind zudem die übrigen Indizes zu verstehen (vgl. obige Notation).

Betrachten wir wieder die exakte Fehlerfunktion $\mathbf{e} = \mathbf{u} - \mathbf{u}_{\mathcal{S}}$ und das Funktional

$$\mathcal{J}(\mathbf{v}) = \frac{1}{2}a(\mathbf{v}, \mathbf{v}) - \rho_{\mathcal{S}}(\mathbf{v}) \text{ mit } \rho_{\mathcal{S}}(\mathbf{v}) = F(\mathbf{v}) - a(\mathbf{u}_{\mathcal{S}}, \mathbf{v}),$$

so gelten für das Funktional \mathcal{J} wegen der Linearität von F die Aussagen von Satz 4.4 und Korollar 4.5 bzgl. der Menge

$$\mathcal{A} = \{\mathbf{v} \in (H_{\Gamma_u}^1(\Omega))^2 \mid v_n - (g - \mathbf{u}_{\mathcal{S}} \cdot \mathbf{n}) \leq 0 \text{ auf } \Gamma_c\} = -\mathbf{u}_{\mathcal{S}} + \mathcal{K}.$$

Betrachten wir nun die Hierarchie $\mathcal{Q}_h \subset \mathcal{S}_h$ mit

$$\mathcal{Q}_h := \{\mathbf{v} \in (C^0(\Omega))^2 \mid \mathbf{v}|_T \in (\mathcal{P}_2)^2 \text{ für } T \in \mathcal{T}_h, \mathbf{v}_{\Gamma_u} = \mathbf{0}\},$$

so erhalten wir analog zu (4.4) und (4.5) das diskrete Defektproblem:

$$\mathbf{e}_{\mathcal{Q}} \in \mathcal{A}_{\mathcal{Q}} : \quad a(\mathbf{e}_{\mathcal{Q}}, \mathbf{v} - \mathbf{e}_{\mathcal{Q}}) \geq F(\mathbf{v} - \mathbf{e}_{\mathcal{Q}}) \quad \forall \mathbf{v} \in \mathcal{A}_{\mathcal{Q}} \quad (4.85)$$

mit $\mathcal{A}_Q = \{\mathbf{v} \in Q_h \mid v_n(p) - (g(p) - (u_S)_n(p)) \leq 0 \forall p \in N_Q \cap \Gamma_c\}$, wobei $N_Q = \mathcal{N}_Q$ wieder die Menge der Mittelpunkte auf den Kanten $E \in \mathcal{E}$ bezeichnet. Da S_h bzw. Q_h komponentenweise mit den Räumen S_h und Q_h übereinstimmt, können wir analog die Aussage von Satz 4.7 im Zweidimensionalen zeigen und somit den hierarchischen Split $Q_h = S_h \oplus V_h$ übertragen, wobei V_h der Raum der zweidimensionalen, quadratischen Bubble-Funktionen ist.

Damit lässt sich jede Funktion $\mathbf{v}_Q \in Q_h$ schreiben als $\mathbf{v}_Q = \mathbf{v}_S + \mathbf{v}_V$ und somit auch die zu $\|\cdot\|^2 = a(\cdot, \cdot)$ äquivalente Norm

$$\begin{aligned} a_Q(\mathbf{v}, \mathbf{w}) &= a(\mathbf{v}_S, \mathbf{w}_S) + \sum_{E \in \mathcal{E}} ((\mathbf{u}_V(x_E))_x (\mathbf{v}_V(x_E))_x a(\psi_{E_x}, \psi_{E_x}) \\ &\quad + (\mathbf{u}_V(x_E))_y (\mathbf{v}_V(x_E))_y a(\psi_{E_y}, \psi_{E_y})) \quad \forall \mathbf{v}, \mathbf{w} \in Q_h \end{aligned}$$

analog zu a_Q einführen, wobei ψ_{E_x}, ψ_{E_y} die Bubble-Funktionen für die Kante $E \in \mathcal{E}$ bzgl. der x- und y-Verschiebungen, bzw. $(\cdot)_x, (\cdot)_y$ die x- und y-Komponenten der dort betrachteten Vektoren sind. Damit können wir analog zu (4.6) bis (4.9) das diskrete lokale Defektproblem aufstellen:

$$\boldsymbol{\varepsilon}_V \in \mathcal{A}_V : \quad \mathcal{I}_Q(\boldsymbol{\varepsilon}_V) \leq \mathcal{I}_Q(\mathbf{v}) \quad \forall \mathbf{v} \in \mathcal{A}_V \quad (4.86)$$

mit $\mathcal{A}_V := \{\mathbf{v} \in V_h \mid v_n(x_E) - (g(x_E) - (u_S)_n(x_E)) \leq 0 \forall E \subset \Gamma_c\}$. Weiter erhalten wir die äquivalente Variationsungleichung zu (4.86):

$$\boldsymbol{\varepsilon}_V \in \mathcal{A}_V : \quad a_Q(\boldsymbol{\varepsilon}_V, \mathbf{v} - \boldsymbol{\varepsilon}_V) \geq \rho_S(\mathbf{v} - \boldsymbol{\varepsilon}_V) \quad \forall \mathbf{v} \in \mathcal{A}_V, \quad (4.87)$$

da auch hier \mathcal{I}_Q die notwendigen Bedingungen zum Anwenden von Satz A.11 aufgrund der zugrunde liegenden Eigenschaften von a und F erfüllt. Die Variationsungleichung (4.87) können wir dann wieder mit Methoden aus der Nichtlinearen Optimierung wie schon mehrmals angesprochen lösen.

Es ist also sinnvoll auch für Kontaktprobleme sich den hierarchischen a posteriori Fehlerschätzer

$$-\mathcal{I}_Q(\boldsymbol{\varepsilon}_V) = -\frac{1}{2} a_Q(\boldsymbol{\varepsilon}_V, \boldsymbol{\varepsilon}_V) + \rho_S(\boldsymbol{\varepsilon}_V)$$

näher anzusehen.

Lokaler Anteil des Fehlerschätzers

Da wir schon gezeigt haben, dass a unter bestimmten Bedingungen eine koerzive, stetige Bilinearform und F eine stetige Bilinearform ist, gelten die Aussagen aus dem Lemma 4.12 auch für \mathcal{I} bzw. ρ_S . Da sich die Eigenschaften von a auch auf a_Q übertragen gilt auch das Korollar 4.13 bezogen auf die Bilinearform a_Q und Linearform $\rho_S(\cdot) = F(\cdot) - a_Q(\mathbf{u}_S, \cdot)$. Daher ist ρ_S auch für Kontaktprobleme äquivalent zum Fehlerschätzer $-\mathcal{I}_Q$ und kann als Fehlerindikator verwendet werden.

Bei der lokalen Aufteilung gibt es jetzt rechnerische Unterschiede zum skalaren Fall aus Kapitel 4.1.2, die hier erörtert werden sollen; das grundlegende Vorgehen bleibt jedoch gleich. Da \mathbf{u}_S in jeder Komponente linear ist über einem Dreieck $T \in \mathcal{T}_h$, gilt die Identität

$$\operatorname{div}(\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}_S)) = \operatorname{div}(\mathcal{C} : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}_S)) = \mathbf{0}, \quad (4.88)$$

wenn \mathcal{C} ein konstanter Tensor ist. Damit lässt sich der Fehlerindikator für ein beliebiges $\mathbf{v} \in (H^1(\Omega))^2$ schreiben als

$$\begin{aligned} \rho_S(\mathbf{v}) &= F(\mathbf{v}) - a(\mathbf{u}_S, \mathbf{v}) = F(\mathbf{v}) - \int_{\Omega} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}_S) : \mathcal{C} : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{v}) d\Omega \\ &= F(\mathbf{v}) - \sum_{T \in \mathcal{T}_h} \int_T \underbrace{\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}_S)}_{=\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}_S)} : \mathcal{C} : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{v}) d\Omega \\ &\stackrel{\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}^T}{=} F(\mathbf{v}) - \sum_{T \in \mathcal{T}_h} \int_T \underbrace{\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}_S) : \operatorname{grad}(\mathbf{v})}_{\substack{(C.2) \\ \stackrel{=} {\operatorname{div}(\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{v} \cdot \mathbf{u}_S))} \\ -\mathbf{v} \cdot \operatorname{div}(\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}_S))}} d\Omega \\ &\stackrel{(C.3a)}{=} F(\mathbf{v}) - \sum_{T \in \mathcal{T}_h} \int_{\partial T} \mathbf{v} \cdot \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}_S) \cdot \mathbf{n} d\Gamma. \end{aligned} \quad (4.89)$$

Jetzt lässt sich (4.89) analog zu der Gleichung (4.18) auch als Summe über die Kanten $E \in \mathcal{E}$ beschreiben. Wenn wir \mathbf{n} wieder als die Einheitsnormale bezeichnen, die von einem gegebenen Dreieck T_1 in das Dreieck T_2 zeigt, dann lässt sich der *Nomalenspannungsfluß* über E berechnen als

$$\mathbf{j}_E := \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}_S|_{T_2}) \cdot \mathbf{n} - \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{u}_S|_{T_1}) \cdot \mathbf{n}.$$

Damit lässt sich (4.89) umformen zu

$$\rho_S(\mathbf{v}) = \int_{\Omega} \mathbf{b} \cdot \mathbf{v} d\Omega + \int_{\Gamma_{\sigma}} \mathbf{t} \cdot \mathbf{v} d\Gamma + \sum_{E \in \mathcal{E}} \int_E \mathbf{v} \cdot \mathbf{j}_E d\Gamma. \quad (4.90)$$

Um nun den lokalen Anteil von ρ_S bzgl. eines Punktes $p \in \mathcal{N}$ zu erhalten, gewichten wir genau wie in (4.19) die Funktion \mathbf{v} mit der Hutfunktion ϕ_p , d.h.

$$\rho_p(\mathbf{v}) := \rho_S(\mathbf{v} \phi_p) \quad \text{mit } \mathbf{v} \in (H^1(\Omega))^2, p \in \mathcal{N}. \quad (4.91)$$

Wegen der Zerlegung der Eins durch ϕ_p können wir die Aussagen von Lemma 4.14 und Korollar 4.15 direkt übertragen, wir erhalten also

$$\rho_p(\mathbf{v}) = \int_{\omega_p} \mathbf{b} \cdot \mathbf{v} \phi_p d\Omega + \sum_{E \in \mathcal{E}_p} \left(\int_{E \subset \Gamma_{\sigma}} \mathbf{t} \cdot \mathbf{v} \phi_p d\Gamma + \int_E \mathbf{v} \cdot \mathbf{j}_E \phi_p d\Gamma \right), \quad (4.92)$$

wobei ω_p und \mathcal{E}_p wie oben definiert sind, und

$$\rho_S = \sum_{p \in \mathcal{N}} \rho_p.$$

Für die Übertragung der Oszillationsterme betrachten wir wieder zwei Teilmengen der Knotenmenge \mathcal{N} .

Definition 4.29. Wir definieren die Menge der *Kontaktknoten* \mathcal{N}^0 und die Menge der *Nichtkontaktknoten* \mathcal{N}^+ analog zu Definition 4.16 durch

$$\mathcal{N}^0 := \{p \in \mathcal{N} \mid (u_S)_n(p) = g(p)\}, \quad \mathcal{N}^+ := \{p \in \mathcal{N} \mid (u_S)_n(p) < g(p)\},$$

wobei $(u_S)_n = \mathbf{u}_S \cdot \mathbf{n}$ ist.

Es sei hier angemerkt, dass nun nicht mehr die inneren Knoten $\mathcal{N} \cup \Omega$ betrachtet werden wie in Definition 4.16, sondern alle Knoten aus \mathcal{N} , da diejenigen Knoten, die in Kontakt stehen können, in den von uns betrachteten Problemen immer auf dem Rand des Gebietes Ω liegen.

Oszillationsterme

Wir definieren die Oszillationen analog zu Kapitel 4.1.3 durch

$$\text{osc}(\mathbf{u}_S, g, \mathbf{b}, \mathbf{t}) := (\text{osc}_1(\mathbf{u}_S, g)^2 + \text{osc}_2(\mathbf{u}_S, g, \mathbf{b})^2)^{\frac{1}{2}}.$$

Dabei ist osc_1 wieder ein Maß für die Hindernisoszillation, d.h.

$$\text{osc}_1(\mathbf{u}_S, g) := \left(\sum_{p \in \mathcal{N}^{0+}} \|\nabla(g - (u_S)_n)\|_{0, \omega_p}^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

wobei $\mathcal{N}^{0+} := \{p \in \mathcal{N}^0 \mid (u_S)_n - g < 0 \text{ in } \omega_p \setminus \{p\}\}$ wieder die isolierten Kontaktknoten enthält. Weiter definieren wir analog zu (4.25) und (4.26) die Mengen

$$\mathcal{N}^{++} := \{p \in \mathcal{N}^+ \mid (\varepsilon_V)_n(x_E) < g(x_E) - (u_S)_n(x_E) \forall E \in \mathcal{E}_p, E \subset \Gamma_c\},$$

$$\mathcal{N}^{0-} := \{p \in \mathcal{N}^0 \mid (u_S)_n = g \forall E \subset \Gamma_c \subset \mathcal{E}_p, \mathbf{b} \leq \mathbf{0} \text{ auf } \omega_p, \mathbf{j}_E \leq \mathbf{0} \forall E \in \mathcal{E}_p\}.$$

Dann lässt sich der zweite Oszillationsterm beschreiben durch

$$\text{osc}_2(\mathbf{u}_S, g, \mathbf{b}) := \left(\sum_{p \in \mathcal{N}^{++}} h_p^2 \|\mathbf{b} - \bar{\mathbf{b}}_p\|_{0, \omega_p}^2 + \sum_{p \in \mathcal{N} \setminus (\mathcal{N}^{++} \cup \mathcal{N}^{0-})} h_p^2 \|\mathbf{b}\|_{0, \omega_p}^2 \right)^{\frac{1}{2}},$$

wobei $\|\mathbf{f}\|_{0, \omega_p}^2 = \int_{\omega_p} |\mathbf{f}|^2 d\Omega$ und $\bar{\mathbf{b}}_p$ analog zu \bar{f}_p der Mittelwert von \mathbf{b} über ω_p ist (komponentenweise integriert).

Kapitel 5

Implementierung des Fehlerschätzers in Matlab

In diesem Kapitel wollen wir uns einen kurzen Überblick über den Quellcode für das programmierte Hindernis- bzw. Kontaktproblem verschaffen. Während wir an dieser Stelle einige wichtige Funktionen detailliert betrachten werden, kann im Anhang D der Matlab-Quellcode komplett eingesehen werden.

In die Implementierung sind neben [ZVKG11] unter anderem auch Resultate aus [MNS00], [BCH05], [Bra13] und [Ste12b] eingeflossen.

5.1 Implementierung eines Hindernisproblems

Grundlegender Aufbau des Programms

In der Datei `start_example*.m` werden die grundlegenden Daten für das betrachtete Beispiel festgelegt, wie beispielsweise

- die Geometriedaten für das Gitter und die Dirichlet-Randbedingungen,
- die exakte Lösung des Funktionals $J(u)$,
- die Lastfunktion f und
- die initiale Triangulierung \mathcal{T}_0 .

Weiter werden nach Ausführung des adaptiven Algorithmus die Galerkin-Lösung und ein Fehlerdiagramm geplottet.

Die Funktion `adaptive_refinement_solution.m` ist das Herzstück des Programms. Diese Datei beinhaltet den Ablauf des Algorithmus 4.1, wobei hier die Abbruchbedingung aus Zeile 5 erweitert wurde. Alle weiteren Programmteile werden in `adaptive_refinement_solution.m` aufgerufen.

Lokale Steifigkeitsmatrix und Assemblierung

Wie schon in Kapitel 2.3, Beispiel 2.26 beschrieben ist es für die Implementierung notwendig eine Verallgemeinerung zur Berechnung der Steifigkeitsmatrix herzuleiten. Die Idee ist an selber Stelle kurz vorgestellt worden; wir wollen nun angelehnt an Abbildung 2.5 die Formeln für die lokale Steifigkeitsmatrix eines beliebigen Elementes T über das Referenzelement

$$\tilde{T} = \{(\xi, \eta) \in \mathbb{R}^2 \mid 0 \leq \xi \leq 1, 0 \leq \eta \leq 1 - \xi\}$$

herleiten. Für die affine Transformation vom Referenzelement auf ein beliebiges Dreieck T gelten die Bedingungen

$$x = x_1 + (x_2 - x_1)\xi + (x_3 - x_1)\eta, \quad (5.1a)$$

$$y = y_1 + (y_2 - y_1)\xi + (y_3 - y_1)\eta, \quad (5.1b)$$

wobei $(x_i, y_i), i = 1, 2, 3$, die Eckpunkte des Dreiecks T sind (vgl. auch Abbildung 2.5). Mit den Bedingungen (5.1) erhalten wir dann die Funktionaldeterminante

$$\begin{aligned} J &= \det \begin{pmatrix} x_2 - x_1 & x_3 - x_1 \\ y_2 - y_1 & y_3 - y_1 \end{pmatrix} \\ &= (x_2 - x_1)(y_3 - y_1) - (x_3 - x_1)(y_2 - y_1). \end{aligned} \quad (5.2)$$

Dabei gilt $J > 0$, da die Orientierung der Eckpunkte von \tilde{T} zu T erhalten bleibt. Wir bezeichnen mit $\tilde{u} : \tilde{T} \rightarrow \mathbb{R}$ eine Funktion über dem Referenzdreieck und mit $u : T \rightarrow \mathbb{R}$ die dazugehörige Funktion über dem allgemeinen Element T . Dann gilt zwischen \tilde{u} und u der Zusammenhang

$$\begin{aligned} u(x, y) &= u(x_1 + (x_2 - x_1)\xi + (x_3 - x_1)\eta, y_1 + (y_2 - y_1)\xi + (y_3 - y_1)\eta) \\ &= \tilde{u}(\xi, \eta). \end{aligned}$$

Wir rechnen also unter Verwendung der Kettenregel nach, dass

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} \tilde{u}_\xi \\ \tilde{u}_\eta \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} x_2 - x_1 & y_2 - y_1 \\ x_3 - x_1 & y_3 - y_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} \\ \iff \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} &= \frac{1}{J} \begin{pmatrix} y_3 - y_1 & y_1 - y_2 \\ x_1 - x_3 & x_2 - x_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{u}_\xi \\ \tilde{u}_\eta \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (5.3)$$

gilt. Damit können wir $\nabla u \nabla v$ auf dem Referenzelement \tilde{T} ausdrücken durch

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} v_x \\ v_y \end{pmatrix} &= \frac{1}{J^2} \begin{pmatrix} \tilde{u}_\xi \\ \tilde{u}_\eta \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} y_3 - y_1 & x_1 - x_3 \\ y_1 - y_2 & x_2 - x_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_3 - y_1 & y_1 - y_2 \\ x_1 - x_3 & x_2 - x_1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{v}_\xi \\ \tilde{v}_\eta \end{pmatrix} \\ &= \frac{1}{J^2} \begin{pmatrix} \tilde{u}_\xi \\ \tilde{u}_\eta \end{pmatrix}^T \begin{pmatrix} a & b \\ b & c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tilde{v}_\xi \\ \tilde{v}_\eta \end{pmatrix} \end{aligned}$$

mit $\begin{cases} a = (y_3 - y_1)^2 + (x_3 - x_1)^2 \\ b = -((y_3 - y_1)(y_2 - y_1) + (x_3 - x_1)(x_2 - x_1)) \\ c = (y_2 - y_1)^2 + (x_2 - x_1)^2 \end{cases}$

5. Implementierung des Fehlerschätzers in Matlab

Insgesamt können wir nun die lokale Bilinearform $a_T(u, v)$ von einem allgemeinen Element T auf das Referenzelement \tilde{T} transformieren.

$$\begin{aligned}
 a_T(u, v) &:= \int_T \nabla u \nabla v \, dx dy = \int_T u_x v_x + u_y v_y \, dx dy \\
 &= \int_{\tilde{T}} \frac{1}{J^2} (a \tilde{u}_\xi \tilde{v}_\xi + b (\tilde{u}_\xi \tilde{v}_\eta + \tilde{u}_\eta \tilde{v}_\xi) + c \tilde{u}_\eta \tilde{v}_\eta) J \, d\xi d\eta \\
 &= \frac{1}{J} \int_{\tilde{T}} a \tilde{u}_\xi \tilde{v}_\xi + b (\tilde{u}_\xi \tilde{v}_\eta + \tilde{u}_\eta \tilde{v}_\xi) + c \tilde{u}_\eta \tilde{v}_\eta \, d\xi d\eta \\
 &= \frac{1}{J} (a S_1 + b S_2 + c S_3)
 \end{aligned} \tag{5.4}$$

Die Matrizen $S_k, k = 1, 2, 3$, beinhalten dann die Anteile der einzelnen Summanden des Integranden aus dem oberen Integral von den jeweiligen lokalen Ansatzfunktionen. Eine Basis der linearen Ansatzfunktionen ist auf dem Referenzelement \tilde{T} beispielsweise von der Form

$$\varphi_1(\xi, \eta) = 1 - \xi - \eta, \quad \varphi_2(\xi, \eta) = \xi, \quad \varphi_3(\xi, \eta) = \eta. \tag{5.5}$$

Damit lassen sich die Einträge von $S := (s_{ij})_{i,j=1,2,3}$ berechnen durch

$$s_{ij} = \int_{\tilde{T}} \varphi_{i,\xi} \varphi_{j,\xi} \, d\xi d\eta, \tag{5.6}$$

d.h. mit (5.5) berechnen wir die Gradienten

$$\nabla \varphi_1(\xi, \eta) = (-1, -1), \quad \nabla \varphi_2(\xi, \eta) = (1, 0), \quad \nabla \varphi_3(\xi, \eta) = (0, 1)$$

und damit ergibt sich beispielsweise

$$s_{11} = \int_0^1 \int_0^{1-\xi} \varphi_{1,\xi} \varphi_{1,\xi} \, d\eta d\xi = \int_0^1 \int_0^{1-\xi} d\eta d\xi = \frac{1}{2}.$$

Analog lassen sich mit (5.6) die weiteren Matrixeinträge aus S_1 berechnen bzw. mit (5.4) und den dazugehörigen Formeln auch S_2 und S_3 :

$$S_1 = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & -\frac{1}{2} & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad S_2 = \begin{pmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{2} & \frac{1}{2} & 0 \end{pmatrix}, \quad S_3 = \begin{pmatrix} \frac{1}{2} & 0 & -\frac{1}{2} \\ 0 & 0 & 0 \\ -\frac{1}{2} & 0 & \frac{1}{2} \end{pmatrix}.$$

Insgesamt ist dann mit (5.4) die lokale Steifigkeitsmatrix für die linearen Ansatzfunktionen eines beliebigen Elementes gegeben durch

$$S = \frac{1}{2J} \begin{pmatrix} a + 2b + c & -a - b & -b - c \\ -a - b & a & b \\ -b - c & b & c \end{pmatrix}.$$

5. Implementierung des Fehlerschätzers in Matlab

Betrachten wir nun eine Basis von quadratischen Ansatzfunktionen auf \tilde{T} , d.h.

$$\varphi_4(\xi, \eta) = 4\xi(1 - \xi - \eta), \quad \varphi_5(\xi, \eta) = 4\xi\eta, \quad \varphi_6(\xi, \eta) = 4\eta(1 - \xi - \eta),$$

dann können wir auch für diese nach Berechnung der Gradienten mit (5.4), (5.6) und den analog resultierenden Formeln eine lokale Steifigkeitsmatrix \bar{S} aufstellen. Diese hat dann die Form

$$\bar{S} = \frac{4}{3J} \begin{pmatrix} a+b+c & -b-c & b \\ -b-c & a+b+c & -a-b \\ b & -a-b & a+b+c \end{pmatrix}.$$

Um das lokale Defektproblem (4.9) zu lösen, ist nicht nur das Aufstellen von Steifigkeitsmatrizen über quadratische Ansatzfunktionen notwendig, sondern auch das Berechnen der rechten Seite $\rho_S(v) = (f, v) - a(u_S, v)$. Auch hier können wir für zumindest einen Teil der Summe einen lokalen Vektor bestimmen. Analog zu (5.4) rechnen wir nach, dass

$$\begin{aligned} a_T(u_S, v) &= \int_T \nabla u_S \nabla v \, dx dy \\ &= \int_{\tilde{T}} (a \tilde{u}_{S,\xi} + b \tilde{u}_{S,\eta}) \tilde{v}_\xi + (b \tilde{u}_{S,\xi} + c \tilde{u}_{S,\eta}) \tilde{v}_\eta \, d\xi d\eta \\ &= \lambda \mathbf{w}_1 + \mu \mathbf{w}_2 \end{aligned} \tag{5.7}$$

gilt, wobei $\mathbf{w}_i, i = 1, 2$, Vektoren sind, deren Einträge gerade die lokalen Anteile an dem i -ten Summanden des Integranden bzgl. der quadratischen Ansatzfunktionen enthalten, analog zu den Matrizen S_k . Wenn wir also eine Lösung $u_S(x, y) = \alpha x + \beta y + \gamma$ auf T gegeben haben, ist der Gradient $\nabla u_S(x, y) = (\alpha, \beta)$ noch auf \tilde{T} zu transformieren. Mit der affinen Transformation (5.1) lässt sich leicht nachrechnen, dass dann

$$\nabla \tilde{u}_S(\xi, \eta) = (\alpha(x_2 - x_1) + \beta(y_2 - y_1), \alpha(x_3 - x_1) + \beta(y_3 - y_1)) =: (\tilde{\alpha}, \tilde{\beta})$$

ist. Damit ist $\lambda = a\tilde{\alpha} + b\tilde{\beta}$ und $\mu = b\tilde{\alpha} + c\tilde{\beta}$. Die Werte α, β des Gradienten auf T lassen sich durch die gegebenen Funktionswerte von u_S an den Eckpunkten des Elementes T berechnen, da u_S auf T linear ist. Dies wird in der Datei `grad_u.m` verwendet. Die Vektoren $\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2$ ergeben sich nun aus

$$\mathbf{w}_1 = \int_0^1 \int_0^{1-\xi} \begin{pmatrix} \varphi_{4,\xi} \\ \varphi_{5,\xi} \\ \varphi_{6,\xi} \end{pmatrix} d\eta d\xi = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{2}{3} \\ -\frac{2}{3} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{w}_2 = \begin{pmatrix} -\frac{2}{3} \\ \frac{2}{3} \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Damit ist der lokale Vektor aus (5.7) bzgl. eines beliebigen Dreiecks T gegeben durch

$$\bar{\boldsymbol{\rho}} = \lambda \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{2}{3} \\ -\frac{2}{3} \end{pmatrix} + \mu \begin{pmatrix} -\frac{2}{3} \\ \frac{2}{3} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{2}{3}(b\tilde{\alpha} + c\tilde{\beta}) \\ \frac{2}{3}(a\tilde{\alpha} + b(\tilde{\beta} + \tilde{\alpha}) + c\tilde{\beta}) \\ -\frac{2}{3}(a\tilde{\alpha} + b\tilde{\beta}) \end{pmatrix}.$$

5. Implementierung des Fehlerschätzers in Matlab

Die hier hergeleiteten Formeln für die lokalen Steifigkeitsmatrizen bzw. Vektoren werden in `local_mat.m` verwendet und ermöglichen einerseits eine leichtere Implementierung, da wir nur über ein Element integrieren müssen, andererseits erzeugen sie aber auch einen schnelleren Programmcode, weil wir keine Integrationen mehr durchführen müssen, um die Steifigkeitsmatrizen aufzustellen.

Die globalen Steifigkeitsmatrizen erzeugen wir dann durch Assemblierung, d.h. wir berechnen für alle Elemente die lokalen Steifigkeitsmatrizen und ordnen mit dem global-local node ordering jedem globalen Knoten in einem Element den jeweils lokalen zu. Damit addieren wir in der globalen Steifigkeitsmatrix im zugehörigen Eintrag den jeweiligen lokalen Eintrag auf. Dieses Vorgehen wird im Programmcode `assemble.m` verwendet. Natürlich ist die Assemblierung für den globalen Vektor aus ρ_S analog.

Quadratur auf einem Dreieck

Das Skalarprodukt $(f, v)_T = \int_T f v dx$ muss allerdings auf den einzelnen Dreiecken T ausgewertet werden. Dies kann leider nur durch direkte Integration geschehen, weil die Last f auf den Elementen variabel sein kann und daher nicht allgemein auf das Referenzdreieck transformierbar ist, so dass wir keinen lokalen Vektor erstellen können, der nur noch assembliert werden muss.

Für die zweidimensionale Integration sind in Matlab beispielsweise die Funktionen `integral2` und `quad2d` implementiert. Um jedoch die Laufzeit des Codes zu verbessern, werden wir direkt eine Gauß-Quadratur über dem Referenzdreieck \tilde{T} verwenden. Eine mögliche Wahl (mit dem dazugehörigen Exaktheitsgrad) ist unter anderem in [Sch] wiederzufinden. Implementiert sind davon die *Seitenmitten-Regel* und die *7-Punkte-Formel*, wobei wir beim Aufrufen des Programmcodes vorwiegend letztere verwenden, um exaktere Ergebnisse zu erhalten. Die lokalen Stützstellen (ξ_k, η_k) und Gewichte w_k für die 7-Punkte-Formel sind auch in [Bra13] Kapitel II, Tabelle 5 zu finden und lauten wie folgt (s. Abbildung 5.1 für die ungefähre Lage der Stützstellen).

k	ξ_k	η_k	w_k
1	1/3	1/3	9/80
2	$(6 + \sqrt{15})/21$	$(6 + \sqrt{15})/21$	$(155 + \sqrt{15})/2400$
3	$(9 - 2\sqrt{15})/21$	$(6 + \sqrt{15})/21$	$(155 + \sqrt{15})/2400$
4	$(6 + \sqrt{15})/21$	$(9 - 2\sqrt{15})/21$	$(155 + \sqrt{15})/2400$
5	$(6 - \sqrt{15})/21$	$(6 - \sqrt{15})/21$	$(155 - \sqrt{15})/2400$
6	$(9 + 2\sqrt{15})/21$	$(6 - \sqrt{15})/21$	$(155 - \sqrt{15})/2400$
7	$(6 - \sqrt{15})/21$	$(9 + 2\sqrt{15})/21$	$(155 - \sqrt{15})/2400$

Tabelle 5.1: Stützstellen (ξ_k, η_k) und Gewichte w_k für die Gauß-Quadratur über das Referenzdreieck \tilde{T}

Um nun das Integral über ein beliebiges Element T zu ziehen, benötigen wir noch die affine Transformation von T auf das Referenzelement \tilde{T} , welche schon weiter oben bei der Berechnung der Steifigkeitsmatrizen genauer beschrieben wurde. Dadurch folgt mit $f(x_1 + (x_2 - x_1)\xi + (x_3 - x_1)\eta, y_1 + (y_2 - y_1)\xi + (y_3 - y_1)\eta) = \tilde{f}(\xi, \eta)$ die Formel

$$\int_T f(x, y) dx dy = \int_{\tilde{T}} \tilde{f}(\xi, \eta) J d\xi d\eta \approx J \sum_{k=1}^7 w_k \tilde{f}(\xi_k, \eta_k). \quad (5.8)$$

Die benötigten Gewichte und Stützstellen für die Quadraturformel über einem Dreieck (5.8) werden durch `quad_tri.m` übergeben. Weiterhin übergibt diese Funktion auch die Funktionswerte der mitgegebenen Ansatzfunktionen. Die Integration kann dann durch Anwendung der Formel (5.8) geschehen.

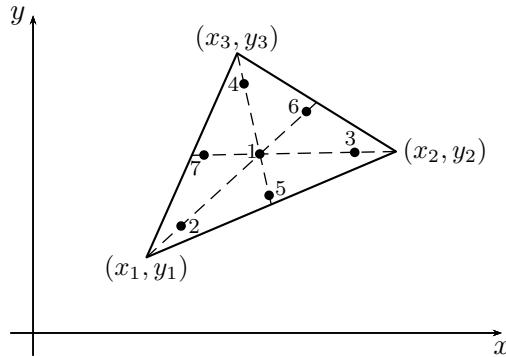


Abbildung 5.1: Veranschaulichung der Lage der Stützstellen in einem allgemeinen Dreieck für die Gauß-Quadratur

Lösung der quadratischen Programme

Wie in Anhang B beschrieben, können wir die konvexen quadratischen Programme, die sich durch Hindernis- oder Kontaktproblem erzeugen, mit dem Active-Set-Algorithmus lösen. Dieser ist unter anderem in der Matlab-Funktion `quadprog` hinterlegt. Allerdings ist der Active-Set-Algorithmus mit steigender Dimension schnell sehr langsam. Das Funktionen-Paket `quadprog` beinhaltet jedoch auch die *Innere-Punkte-Methode* (kurz: IPM), welche für große Systeme wesentlich schneller ist als die Active-Set-Methode. Daher verwenden wir die IPM zur Lösung der quadratischen Programme. Außerdem verwenden wir dazu *Sparse*-Matrizen und die Option *large-scale*, um die Auswertung zu beschleunigen.

Berechnung des Normalenflußes

Mit der Funktion `normal_flux.m` berechnen wir für jede Kante aus der übergebenen Kantemenge E_p den Normalenfluß j_E . Hierfür werden für jede Kante $E \in E_p$ die Indizes der anliegenden Dreiecke berechnet (dies geschieht mit der Funktion `neighbourhood.m`). Dabei gibt der Parameter `flag` an, ob eine Kante nur einen oder zwei Nachbarn besitzt, d.h. sie ob Randkante ist oder innen liegt. Durch die Indizes der anliegenden Dreiecke lassen sich die Eckpunkte und damit die Gradienten von u_S auf T_1 und T_2 sowie der Normalenvektor \mathbf{n} , der immer von T_1 nach T_2 zeigen soll, berechnen. Da diese Eigenschaft durch die gewählte Erzeugung des Normalenvektors im Code nicht immer erfüllt sein muss, wird überprüft, ob der berechnete Vektor \mathbf{n} mit einer der übrigen Kanten aus T_1 einen Winkel $\alpha \in (0, \frac{\pi}{2})$ einschließt. Sollte dies der Fall sein, so drehen wir den Vektor \mathbf{n} um, ansonsten beschreibt er schon die gewünschte Richtung. Danach werden die durch das Skalarprodukt $\nabla(u_S|_{T_i}) \cdot \mathbf{n}$ berechneten Richtungsableitungen noch voneinander abgezogen, um j_E zu erhalten.

Berechnung der einzelnen Knotenmengen

Um die Knotenmengen \mathcal{N}^0 und \mathcal{N}^+ zu berechnen, müssen wir zunächst die inneren Knoten $\mathcal{N} \cap \Omega$ bestimmen. Dies kann man sehr leicht durch die Adjazenzmatrix $H \in \{0, 1\}^{m \times n}$, die mit der Funktion `assemb` berechnet werden kann und durch den Matrixeintrag 1 angibt welcher der n Knoten einer der m Randknoten ist, bestimmen. Dafür berechnen wir eine Vergleichsmatrix, die überprüft, welcher der Einträge in H gleich Null ist, und bilden dann spaltenweise das Produkt. Die Einträge, die in dem erzeugten Vektor, ungleich Null sind, können keine Randpunkte sein.

Die inneren Kontakt- und Nichtkontaktknoten lassen sich dann leicht durch Überprüfen der Bedingungen berechnen, bzw. die Nichtkontaktknoten lassen sich auch einfach als Komplement zu den Kontaktknoten bilden. Bei der Berechnung der Kontaktknotenindizes ist zu beachten, dass wegen der Approximationsfehler eine obere Fehlerschranke $\varepsilon \approx 0$ verwendet wird. Dieses Vorgehen wird in `N0.m` und `Nplus.m` verwendet.

Analog kann man auch die Menge der Knoten \mathcal{N}^{++} (s. `Nplusplus.m`) implementieren, indem wir die Bedingung aus der Definition mit den mitgegebenen Daten überprüfen.

Dies ist für die Menge der isolierten Kontaktknoten \mathcal{N}^{0+} und der Kontaktknoten mit vollständigem Kontakt \mathcal{N}^{0-} nicht mehr so einfach möglich. Die nun beschriebenen Ideen sind gemeinsam in der Datei `N0plusminus.m` angewendet. Da wir in Matlab keine kompletten Funktionen miteinander vergleichen können (s. Bedingung $u_S = \psi$ auf ganz ω_p), transformieren wir die Dreiecke T wieder auf das Referenzdreieck und vergleichen einzelne Funktionswerte bzgl. eines möglichst engmaschigen Gitters auf diesem. Hierbei

laufen wir in einer Schleife über alle Dreiecke $T \subset \omega_p$ und berechnen auf jedem Dreieck die Funktionswerte von $u_S - \psi$ auf dem betrachteten Gitter. Um nun zu überprüfen, ob p ein isolierter Kontaktknoten ist, müssen wir aus den berechneten Funktionswerten die der Eckpunkte eliminieren, was in Zeile 52-60 geschieht. Sollte nun ein Funktionswert kleiner oder gleich Null sein, so kann p kein isolierter Kontaktknoten mehr sein und wir setzen daher `flag_plus=1`, womit wir später diese Entscheidung fällen, wenn wir aus der Schleife über alle Dreiecke T kommen. Sollten nun aber alle Funktionswerte an den Eckpunkten von ψ und u_S übereinstimmen, so gilt wegen der Linearität der beiden Funktionen die Gleichheit und weiter $f \leq 0$ an den betrachteten Gitterpunkten, so erhöhen wir den Parameter `flag_minus` um Eins, mit dem wir damit später entscheiden können, ob die Bedingung auch auf allen Dreiecken von ω_p gilt. Es fehlt also nur noch die Überprüfung, ob `flag_plus = 0` ($\Rightarrow p \in \mathcal{N}^{0+}$) bzw. `flag_minus = |ωp|` und $j_E \leq 0$ für alle $E \in \mathcal{E}_p$ ($\Rightarrow p \in \mathcal{N}^{0-}$) ist.

Oszillationsterme

Die Berechnung der Oszillationsterme geschieht in `osc1.m` und `osc2.m`. Die größte Schwierigkeit zur Implementierung dieser, liegt in der Bestimmung der einzelnen Punktemengen, die oben beschrieben wurde. Daher werden hier größtenteils nur die Integrale aus $\text{osc}_1(u_S, \psi)$ und $\text{osc}_2(u_S, \psi, f)$ eingearbeitet.

Bestimmung der lokalen Anteile des Fehlerindikators $\rho_S(\varepsilon_V)$

In der Datei `eval_rho_p.m` werden die lokalen Anteile $\rho_p(\varepsilon_V) = \rho_S(\varepsilon_V \phi_p)$ berechnet. Dabei werden die einzelnen Integrale mit der oben beschriebenen Quadratur berechnet. Es bleibt nur noch anzumerken, dass die Kurvenintegrale

$$\int_E j_E \varepsilon_V(x_E) \phi_E \phi_p ds = j_E \varepsilon_V(x_E) \int_E \phi_E \phi_p ds$$

über alle Kanten $E \in \mathcal{E}$ mittels eindimensionaler Quadratur bestimmt werden können, wobei wir auch hier das Integral auf das Referenzintervall $[-1, 1]$ transformieren. Die Quadratur selbst ist danach leicht durchzuführen, weil ϕ_p auf einer Kante E identisch zu einer ansteigenden oder abfallenden Gerade und ϕ_E gleich einer nach unten geöffneten Parabel ist, die auf dem Anfangs- und Endpunkt ihre Nullstellen hat. Daher lassen sich die Werte

$$\int_{-1}^1 \phi_E(x(\xi), y(\xi)) \phi_p(x(\xi), y(\xi)) d\xi$$

unabhängig von E bestimmen und müssen später nur noch mit der Funktionaldeterminante $J = \frac{|E|}{2}$ multipliziert werden.

Berechnung des zu verfeinernden Dreiecksindizes

Im Quellcode `find_triangle_refinement.m` werden die Indizes der zu verfeinernden Dreiecke berechnet. Dies geschieht dadurch, dass wir so lange die größten Anteile vom Fehlerindikator ρ_S heraussuchen, bis jene größer als ein skalierter Wert des Indikators sind. Dasselbe Vorgehen verwenden wir dann noch für die Oszillationsterme. Für die damit erhaltenen Punktindizes berechnen wir mit `neighbourhood` die anliegenden Dreiecke und übergeben diese für die Verfeinerung.

Sollten wir ein symmetrisches Problem vorliegen haben, dann ist es von Vorteil dieses auch symmetrisch bzgl. der Netzverfeinerung bzw. der Lösung zu halten. In diesem Fall sind auch die Fehleranteile im hierarchischen Fehlerschätzer $-\mathcal{I}_Q(\varepsilon_V)$ bzw. Fehlerindikator ρ_S symmetrisch angeordnet. Hierfür können wir den Wert `option` auf 'symmetric' setzen. Dies bewirkt, dass bei der Auswahl eines Fehleranteiles alle weiteren Punkte mit demselben Anteil direkt mit gewählt werden. Damit kann es zu einer stärkeren Netzverfeinerung kommen, das erzeugte Gitter bleibt jedoch symmetrisch und damit auch die dadurch berechnete Galerkin-Lösung.

5.2 Implementierung eines Kontaktproblems

Für die Untersuchung eines Kontaktproblems ist das *Hertz'sche Kontaktproblem* implementiert worden. Hierbei handelt es sich um einen Zylinder, der mit einer Oberflächenlast t belastet auf eine Ebene gedrückt wird.

Grundlegende Änderungen in der Implementierung bzgl. des Hindernisproblems

Der Aufbau der Startdatei bleibt grundlegend gleich; es ändern sich nur die Übergabe der Lastfunktionen (Volumenlast b und Flächenlast t) und es müssen neue Parameter μ und λ , die Lamé-Konstanten, hinzugefügt werden. Diese werden als Vektor übergeben, damit wir für den Zylinder und die Ebene verschiedene Elastizitäten erhalten.

Da wir den Zylinder nur vertikal, d.h. normal zur Ebene, belasten, wird für die Gap-Funktion der Einfachheit halber nicht der Normalenvektor an Ω verwendet, sondern der Vektor $(0, \pm 1)^T$.

Da wir nun zwei verschiedene Lasten erhalten, was den Lastvektor der rechten Seite in der Variationsungleichung ändert, und auch eine andere Bilinearform $a(\cdot, \cdot)$ verwenden, sowie verschiedene Randbedingungen haben, müssen in folgenden Dateien Änderungen vorgenommen werden:

- `assemble.m`,
- `local_mat.m`,

- `eval_rho_p.m`,
- `normal_flux.m`,
- `adaptive_refinement_solution.m`.

Zu den Änderungen gibt es noch zwei neue Dateien: `quad_edge.m` und `boundary_disjunction.m`. Erstere arbeitet analog zu `quad_tri.m` und gibt einfach die Stützstellen und Gewichte für die Gauß-Quadratur über eine Kante mit den dazu gegebenen Eckpunkten wieder zurück. Der Quellcode `boundary_disjunction.m` berechnet für die übergebenen Randpunkte drei disjunkte Teilmengen von Randpunkten, die mit den Dirichlet-, Neumann und Kontaktrandpunkten übereinstimmen.

Lokale Steifigkeitsmatrizen und Assemblierung

Die Assemblierung der lokalen Matrizen bzw. Vektoren ist nur leicht verändert. Da wir in dem Kontaktproblem ein Verschiebungsfeld berechnen, werden die Matrizen und Vektoren doppelt so groß als im Hindernisproblem. Um weiterhin eine Struktur zu behalten, werden x- und y-Verschiebung blockweise in den Verschiebungsvektor hintereinander geschrieben. Dies führt dazu, dass die Steifigkeitsmatrix A aus (2×2) -Blockmatrizen zusammengebaut wird. Analog ist das Vorgehen für den Lastvektor blockweise durchzuführen. Als Änderung zum Hindernisproblem erhalten wir hier jedoch auch eine Last, die auf bestimmten Randpunkten (Neumann-Rand) existiert. Diese wird mithilfe von `quad_edge.m` durch direkte Integration über die jeweiligen Randkanten in den Lastvektor in die passenden Komponenten eingepflegt.

Die Berechnung der lokalen Steifigkeitsmatrizen wird analog zu (5.4) hergeleitet. Wir rechnen nach, dass bzgl. des Referenzdreiecks \tilde{T} gilt:

$$\begin{aligned}
 a_T(\mathbf{u}, \mathbf{v}) &= \int_T \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{u}) : \mathcal{C} : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{v}) \, dx dy \\
 &= \frac{1}{J} \int_{\tilde{T}} a \tilde{u}_{1,1} \tilde{v}_{1,1} + b (\tilde{u}_{1,2} \tilde{v}_{1,1} + \tilde{u}_{1,1} \tilde{v}_{1,2}) + c (\tilde{u}_{2,1} \tilde{v}_{2,2} + \tilde{u}_{2,2} \tilde{v}_{2,1}) \\
 &\quad + d (\tilde{u}_{1,1} \tilde{v}_{2,2} + \tilde{u}_{2,2} \tilde{v}_{1,1}) + e (\tilde{u}_{1,1} \tilde{v}_{2,1} + \tilde{u}_{2,1} \tilde{v}_{1,1}) + f \tilde{u}_{1,2} \tilde{v}_{1,2} \\
 &\quad + g \tilde{u}_{2,1} \tilde{v}_{2,1} + h (\tilde{u}_{1,2} \tilde{v}_{2,1} + \tilde{u}_{2,1} \tilde{v}_{1,2}) + i (\tilde{u}_{1,2} \tilde{v}_{2,2} + \tilde{u}_{2,2} \tilde{v}_{1,2}) \\
 &\quad + j \tilde{u}_{2,2} \tilde{v}_{2,2} \, d\xi d\eta, \tag{5.9}
 \end{aligned}$$

wobei für beide Komponenten von \mathbf{u} und \mathbf{v} jeweils die Kettenregel (5.3) angewendet angewendet wurde. Wir lesen $(\cdot)_{i,j}$ so, dass die i -te Komponente von (\cdot) nach der j -ten Variable abgeleitet wird. Die Koeffizienten aus (5.9)

5. Implementierung des Fehlerschätzers in Matlab

berechnen sich als

$$\begin{aligned}
a &= \mu(x_3 - x_1)^2 + (2\mu + \lambda)(y_3 - y_1)^2, \\
b &= -(\mu(x_3 - x_1)(x_2 - x_1) + (2\mu + \lambda)(y_3 - y_1)(y_2 - y_1)), \\
c &= -(\mu(y_3 - y_1)(y_2 - y_1) + (2\mu + \lambda)(x_3 - x_1)(x_2 - x_1)), \\
d &= \mu(x_3 - x_1)(y_2 - y_1) + \lambda(y_3 - y_1)(x_2 - x_1), \\
e &= -(\mu + \lambda)(x_3 - x_1)(y_3 - y_1), \\
f &= \mu(x_2 - x_1)^2 + (2\mu + \lambda)(y_2 - y_1)^2, \\
g &= \mu(y_3 - y_1)^2 + (2\mu + \lambda)(x_3 - x_1)^2, \\
h &= \mu(x_2 - x_1)(y_3 - y_1) + \lambda(x_3 - x_1)(y_2 - y_1), \\
i &= -(\mu + \lambda)(x_2 - x_1)(y_2 - y_1), \\
j &= \mu(y_2 - y_1)^2 + (2\mu + \lambda)(x_2 - x_1)^2.
\end{aligned}$$

Als Basis für \mathcal{S}_h über dem Referenzelement \tilde{T} verwenden wir

$$\begin{aligned}
\psi_1(\xi, \eta) &= \begin{pmatrix} 1 - \xi - \eta \\ 0 \end{pmatrix}, & \psi_2(\xi, \eta) &= \begin{pmatrix} 0 \\ 1 - \xi - \eta \end{pmatrix}, & \psi_3(\xi, \eta) &= \begin{pmatrix} \xi \\ 0 \end{pmatrix}, \\
\psi_4(\xi, \eta) &= \begin{pmatrix} 0 \\ \xi \end{pmatrix}, & \psi_5(\xi, \eta) &= \begin{pmatrix} \eta \\ 0 \end{pmatrix}, & \psi_6(\xi, \eta) &= \begin{pmatrix} 0 \\ \eta \end{pmatrix}.
\end{aligned}$$

Mit dieser Basis und den übrigen Resultaten lässt sich aus (5.9) die lokale Steifigkeitsmatrix mit umfangreicher Rechnung zu

$$S = \frac{1}{2J} \begin{pmatrix} a + 2b & d + e + h + i & -a - b & -e - h & -b - f & -d - i \\ d + e + h + i & 2c + j + g & -d - e & -c & -h - i & -c - j \\ -a - b & -d - e & a & e & b & d \\ -e - h & -c & e & g & h & c + d \\ -b - f & -h - i & b & h & f & i \\ -d - i & -c - j & d & c + d & i & j \end{pmatrix}$$

bestimmen. Analog zu der linearen Basis können wir auch eine Basis aus quadratischen Bubble-Funktionen erstellen. Da die Berechnung der lokalen Steifigkeitsmatrix in diesem Fall sehr aufwendig ist und wir für die Bilinearform a_Q nur die Hauptdiagonale der Matrix benötigen, bestimmen wir diese analog zu S als

$$\bar{S} = \frac{4}{3J} \text{diag}(a + b + f, c + g + j, a + b + f, c + g + j, a + b + f, c + g + j).$$

Wie im eindimensionalen Fall können wir auch hier wieder den lokalen Anteil von $a(\mathbf{u}_S, \mathbf{v})$ für ein Dreieck T berechnen. Wir berechnen auch hier unter

Verwendung der Kettenregel (5.3), dass auf einem Dreieck T

$$\begin{aligned} a_T(\mathbf{u}_S, \mathbf{v}) &= \frac{1}{J} \int_{\tilde{T}} (a \tilde{u}_{S_{1,1}} + b \tilde{u}_{S_{1,2}} + e \tilde{u}_{S_{2,1}} + d \tilde{u}_{S_{2,2}}) \tilde{v}_{1,1} \\ &\quad + (b \tilde{u}_{S_{1,1}} + f \tilde{u}_{S_{1,2}} + h \tilde{u}_{S_{2,1}} + i \tilde{u}_{S_{2,2}}) \tilde{v}_{1,2} \\ &\quad + (e \tilde{u}_{S_{1,1}} + h \tilde{u}_{S_{1,2}} + g \tilde{u}_{S_{2,1}} + c \tilde{u}_{S_{2,2}}) \tilde{v}_{2,1} \\ &\quad + (d \tilde{u}_{S_{1,1}} + i \tilde{u}_{S_{1,2}} + c \tilde{u}_{S_{2,1}} + j \tilde{u}_{S_{2,2}}) \tilde{v}_{2,2} d\xi d\eta \\ &= \alpha \bar{\mathbf{w}}_1 + \beta \bar{\mathbf{w}}_2 + \gamma \bar{\mathbf{w}}_3 + \delta \bar{\mathbf{w}}_4 \end{aligned}$$

gilt. Durch Einsetzen der Basisfunktionen in $a_T(\mathbf{u}_S, \mathbf{v})$ ergeben sich analog zu $\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2$ die einzelnen lokalen Anteile von ρ_S mit

$$\bar{\mathbf{w}}_1 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{2}{3} \\ 0 \\ -\frac{2}{3} \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \bar{\mathbf{w}}_2 = \begin{pmatrix} -\frac{2}{3} \\ 0 \\ \frac{2}{3} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \bar{\mathbf{w}}_3 = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{2}{3} \\ 0 \\ -\frac{2}{3} \end{pmatrix}, \quad \bar{\mathbf{w}}_4 = \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{2}{3} \\ 0 \\ \frac{2}{3} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}.$$

Berechnung der lokalen Anteile von ρ_S

Für die Berechnung der lokalen Anteile von $\rho_S(\boldsymbol{\varepsilon}_V)$ verwenden wir die Gleichung (4.91). Diese ist analog zum Hindernisproblem definiert, nur dass in den Integralen Skalarprodukte, und somit mehrere Summanden, vorhanden sind über die integriert werden müssen. Der grundlegende Aufbau des Quellcodes bleibt also gleich.

In Punkten, die auf dem Neumann-Rand liegen, müssen wir noch die Anteile aus dem Randintegral im Vektor der lokalen Anteile von $\rho_S(\boldsymbol{\varepsilon}_V)$ hinzufügen.

Berechnung des Normalenspannungsflußes

Der Normalenspannungsfluß \mathbf{j}_E , der zwischen den Gleichungen (4.89) und (4.90) definiert ist, ist analog zum Normalenfluß definiert. Da allerdings hier die Spannung für \mathbf{u}_S berechnet werden muss, werden der Funktion `normal_flux.m` zusätzlich die Lamé-Konstanten λ und μ übergeben. Diese fließen im Quellcode in die Beziehung $\boldsymbol{\sigma} = \mathcal{C} : \boldsymbol{\varepsilon} = 2\mu\boldsymbol{\varepsilon} + \lambda(\text{tr } \boldsymbol{\varepsilon})\mathbf{I}$ ein. Der sonstige Aufbau der Datei bleibt gleich und wir nutzen aus, dass wir mit `gradu.m` die Gradienten für die erste und zweite Komponente des Verschiebungsfeldes \mathbf{u} getrennt berechnen können.

Besonderheiten in `adaptive_refinement_solution.m`

Auch hier muss der grundlegende Aufbau des Quellcodes nicht verändert werden, allerdings müssen ein paar Zusätze eingefügt werden. Diese beziehen sich vor allem auf die Tatsache, dass die Nebenbedingung bzgl. des

5. Implementierung des Fehlerschätzers in Matlab

Hindernisses nicht mehr auf ganz Ω gilt, sondern noch auf einem Teil des Randes, dem Kontaktrand Γ_c . Daher berechnen wir uns zunächst die Indizes für die Randpunkte, die auf dem Kontaktrand liegen und bestimmen alle notwendigen Größen zur Lösung der Variationsungleichung bzgl. dieser Punkte. Also wird das Hindernis (hier die Gap-Funktion) beispielsweise nur an den Kontaktrandpunkten ausgewertet. Weiter müssen wir für diese Punkte auch die Matrix B aus Kapitel 3.2.3 aufstellen. Da wir der Einfachheit halber für \mathbf{n} die Vektoren $(0, \pm 1)^T$ verwendet haben (je nach Lage des Knotens), erhalten wir für B eine $(m \times n)$ -Matrix ($m = |\mathcal{N}_{\Gamma_c}|, n = |\mathcal{N}|$), die in jeder Zeile nur einen Eintrag ungleich Null hat. Dieser Eintrag ist ± 1 hat. Dieser befindet sich gerade in der $2k$ -ten Spalte, wenn der dazugehörige Randpunkt den Index k hat. (Analogen Vorgehen ist für die Nebenbedingung des lokalen Defektproblems notwendig.)

Erweiterung der vorhandenen Implementierung

In der Implementierung fehlt die Verwendung der Oszillationsterme. Wenn diese noch eingearbeitet werden, kann man analog zum Algorithmus 4.1 den Schritt 9 auf das Kontaktproblem übertragen. Damit wird erreicht, dass sich mit Sicherheit in jedem Verfeinerungsschritt die Oszillationen verringern.

Kapitel 6

Validierung

In diesem Kapitel wollen wir numerische Beispiele für das Hindernis- bzw. Kontaktproblem diskutieren. Dabei werden Auswertungen verwendet, die aus dem Quellcode aus Anhang D resultieren.

Die untersuchten numerischen Beispiele wurden aus den Veröffentlichungen [SV07], [BCH07], [BCH09] und [CSW99] entnommen.

6.1 Numerische Beispiele zum Hindernisproblem

Beispiel 6.1 (glatte, rotationssymmetrische Lösung). Wir betrachten das Hindernisproblem mit dem Hindernis $\psi \equiv 0$ und der Lastfunktion $f \equiv -2$ auf $\Omega = [-\frac{3}{2}, \frac{3}{2}]^2$. Die Dirichlet-Randbedingungen werden durch die Funktion

$$\tilde{u}(x, y) = \frac{x^2 + y^2}{2} - \frac{1}{2} \ln(x^2 + y^2) - \frac{1}{2}$$

gegeben. Für dieses Problem existiert eine exakte (glatte) Lösung, die in Polarkoordinaten wie folgt lautet:

$$u(r, \varphi) = \begin{cases} \frac{r^2}{2} - \ln(r) - \frac{1}{2} & , r \geq 1 \\ 0 & , \text{ sonst} \end{cases}. \quad (6.1)$$

Damit lässt sich der exakte Wert des Energiefunktionalen $J(u)$ mit (6.1) ermitteln. Hierfür nutzen wir die Rotationssymmetrie von u aus, da u unabhängig vom Drehwinkel φ ist. Dadurch reicht es aus, die zu berechnenden Integrale nur im ersten Quadranten von Ω zu berechnen. Um jetzt $J(u) = \frac{1}{2}a(u, u) - (f, u)$ zu bestimmen, müssen wir mit der Kettenregel den Zusammenhang zwischen u_x, u_y und u_r, u_φ ermitteln. Dieser ergibt sich zu

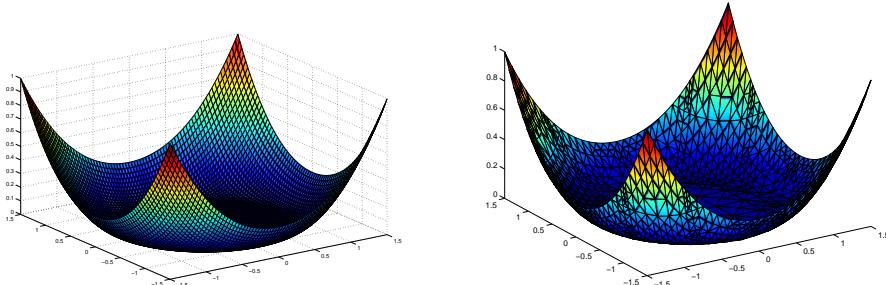
$$\begin{pmatrix} u_x \\ u_y \end{pmatrix} = \frac{1}{r} \begin{pmatrix} r \cos \varphi & -\sin \varphi \\ r \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} u_r \\ u_\varphi \end{pmatrix}. \quad (6.2)$$

6. Validierung

Da $u_\varphi = 0$ und $u_r = r - \frac{1}{r}$ gilt, erhalten wir für den exakten Wert des Energiefunktionalen unter Verwendung von (6.2)

$$\begin{aligned}
J(u) &= \frac{1}{2} \int_{\Omega} \underbrace{\nabla u \nabla u}_{=u_x^2+u_y^2} dx dy - \int_{\Omega} f u dx dy \\
&= 4 \left(\frac{1}{2} \int_0^{\frac{\pi}{4}} \int_1^{\frac{3}{2 \cos \varphi}} (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) \left(r - \frac{1}{r}\right)^2 r dr d\varphi \right. \\
&\quad + \frac{1}{2} \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{3\pi}{4}} \int_1^{\frac{3}{2 \sin \varphi}} (\cos^2 \varphi + \sin^2 \varphi) \left(r - \frac{1}{r}\right)^2 r dr d\varphi \\
&\quad + 2 \int_0^{\frac{\pi}{4}} \int_1^{\frac{3}{2 \cos \varphi}} \left(\frac{r^2}{2} - \ln(r) - \frac{1}{2}\right) r dr d\varphi \\
&\quad \left. + 2 \int_{\frac{\pi}{4}}^{\frac{3\pi}{4}} \int_1^{\frac{3}{2 \sin \varphi}} \left(\frac{r^2}{2} - \ln(r) - \frac{1}{2}\right) r dr d\varphi \right) \\
&\approx 3,980995748730258.
\end{aligned}$$

Die oberen Grenzen $\frac{3}{2 \cos \varphi}$ und $\frac{3}{2 \sin \varphi}$ kommen dabei durch Beschreibung der Randpunkte von Ω in Polarkoordinaten für $\varphi \in [0, \frac{\pi}{4}]$ zustande. Die Rotationssymmetrie kann auf das zweite Integral nur deshalb angewendet werden, weil f eine konstante (und damit auch rotationssymmetrische) Funktion ist.



(a) Exakte Lösung für das Hindernisproblem (b) Numerische Lösung in der Verfeinerungsstufe 6 mit $\theta_1 = 0,4$ und $\theta_2 = 0,3$

Abbildung 6.1: Exakte und numerische Lösung des Beispiels 6.1

In Abbildung 6.1 ist die exakte Lösung und die Galerkin-Lösung auf der Verfeinerungsstufe 6 der implementierten, adaptiven Verfeinerungsstrategie im Vergleich dargestellt. In der Tabelle 6.1 sind die Ergebnisse für das Beispiel für $\theta_1 = 0,3$ und $\theta_2 = 0,2$, sowie für eine uniforme Verfeinerung angegeben. Die maximale Anzahl der Knoten $|\mathcal{N}|$ ist jeweils mittels der Implementierung auf 150.000 begrenzt. Man kann gut erkennen, dass die An-

6. Validierung

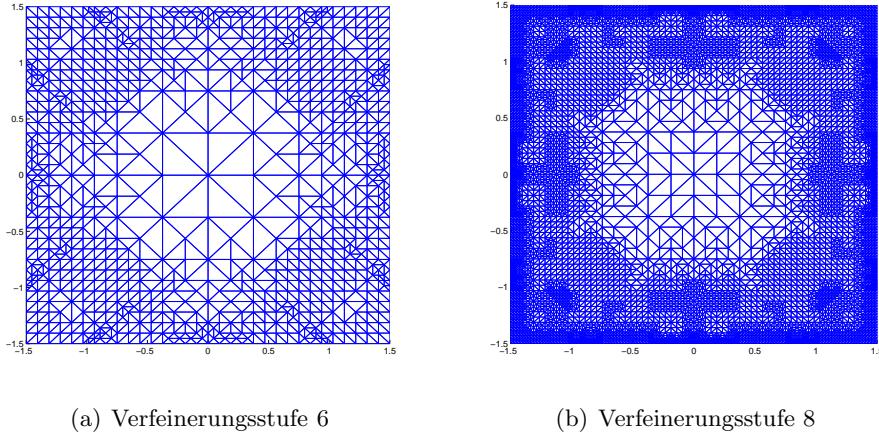


Abbildung 6.2: Gitterverfeinerung für das Hindernisproblem im Beispiel 6.1 mit $\theta_1 = 0,4$ und $\theta_2 = 0,3$

zahl der Knoten im uniformen Fall wesentlich schneller ansteigt. Da in den ersten Verfeinerungsstufen sehr wenig Knoten vorhanden sind, gleichen sich zunächst die adaptive und uniforme Verfeinerung. Der starke Anstieg des Freiheitsgrades in den letzten beiden Schritten liegt daran, dass die lokalen Anteile des Fehlerindikators ρ_S sehr klein werden (wegen hoher Knotenzahl) und kann durch eine variable Wahl der Parameter θ_1 und θ_2 verringert werden.

Weiter stellen wir in Abbildung 6.2 eine adaptive Gitterverfeinerung für das Beispiel 6.1, das mit `start_example_1.m` für $\theta_1 = 0,4$ und $\theta_2 = 0,3$ erzeugt werden kann, in den Stufen 6 und 8 dar und man kann gut erkennen, dass im Bereich des vollen Kontaktes weniger stark verfeinert wird. Weiter kann man sehen, dass durch die Option '`'symmetric'`' das Gitter auch symmetrisch von Verfeinerungsschritt zu Verfeinerungsschritt angeordnet bleibt.

In Abbildung 6.3 sind die Oszillationen in für mehrere Verfeinerungsstufen k dargestellt. Dabei kann man erkennen, dass es in der Stufe $k = 1$ noch einen isolierten Knoten, den Ursprung, gibt, der jedoch durch Verfeinerung verschwindet, weil es keinen äquivalenten, isolierten Kontaktspunkt für die exakte Lösung gibt. Außerdem können wir sehen, dass durch die Bedingung aus Lemma 4.24 der Wert der Oszillationsterme von Verfeinerung zu Verfeinerung sinkt.

6. Validierung

Stufe	Adaptive Verfeinerung				Uniforme Verfeinerung	
	$ \mathcal{N} $	$\rho_S(\varepsilon_V)$	$-\mathcal{I}_Q(\varepsilon_V)$	$-\mathcal{I}(e)$	$ \mathcal{N} $	$-\mathcal{I}(e)$
1	9	6.3512	3.1756	4.6323	9	4.6323
2	25	1.8284	0.9142	1.0978	25	1.0978
3	81	0.8642	0.4349	0.2667	81	0.2667
4	197	0.5422	0.2713	0.1113	289	0.0670
5	357	0.3896	0.1949	0.0564	1089	0.0167
6	821	0.2564	0.1282	0.0231	4225	0.0046
7	1133	0.1896	0.0948	0.0141	16641	0.0014
8	1957	0.0993	0.0497	0.0079	66049	0.0010
9	7569	0.0476	0.0238	0.0020		
10	29761	0.0223	0.0112	0.0018		
11	118017	0.0075	0.0037	0.0007		

Tabelle 6.1: Vergleich von adaptiver ($\theta_1 = 0, 4; \theta_2 = 0, 3$) und uniformer Verfeinerung für Beispiel 6.1 mit Angabe des Freiheitsgrades, a posteriori Fehlerschätzer und exaktem Fehler

Beispiel 6.2 (Singularität und L-förmiges Gebiet). Wir wollen nun ein Hindernisproblem mit Singularität im Nullpunkt betrachten, was zu einer starken Verfeinerung an diesem Punkt führen muss. Hierfür sei das Gebiet L-förmig, also von der Form

$$\Omega := (-2, 2)^2 \setminus ([0, 2] \times [-2, 0]).$$

Das Hindernis sei wieder durch $\psi \equiv 0$ gegeben und die Lastfunktion in Polarkoordinaten (r, φ) durch

$$f(r, \varphi) := -r^{\frac{2}{3}} \sin\left(\frac{2\varphi}{3}\right) \left(\frac{\gamma'_1(r)}{r} + \gamma''_1(r)\right) - \frac{4}{3} r^{\frac{1}{3}} \gamma'_1(r) \sin\left(\frac{2\varphi}{3}\right) - \gamma_2(r),$$

wobei mit $\bar{r} = 2(r - \frac{1}{4})$ gilt

$$\begin{aligned} \gamma_1(r) &= \begin{cases} 1 & , \bar{r} < 0 \\ -6\bar{r}^5 + 15\bar{r}^4 - 10\bar{r}^3 + 1 & , 0 \leq \bar{r} < 1 \\ 0 & , \bar{r} \geq 1 \end{cases}, \\ \gamma_2(r) &= \begin{cases} 0 & , r < \frac{5}{4} \\ 1 & , \text{sonst} \end{cases}. \end{aligned}$$

Für dieses Problem gibt es eine exakte Lösung, die in Polarkoordinaten

$$u(r, \varphi) = r^{\frac{2}{3}} \gamma_1(r) \sin\left(\frac{2\varphi}{3}\right)$$

lautet. Die Funktion hat im Ursprung eine Singularität. Damit können wir auch für dieses Beispiel mit den Umformungen aus (6.2) den exakten Wert

6. Validierung

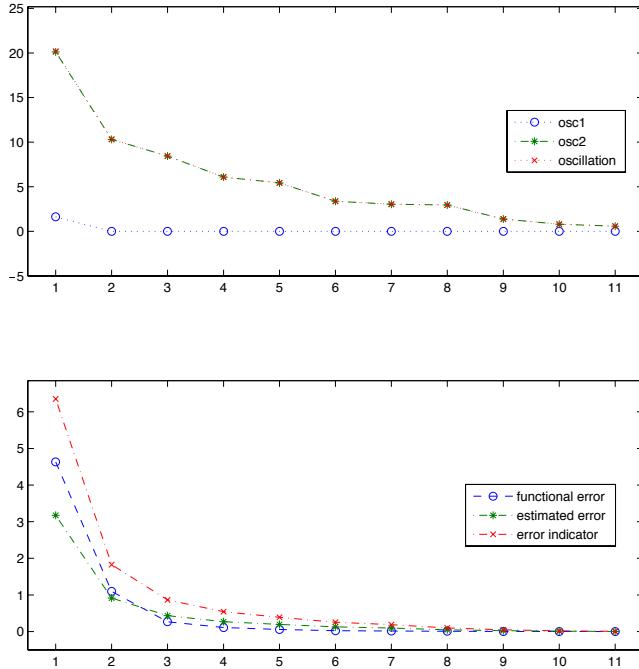


Abbildung 6.3: Oszillationsterme, Fehlerindikator ρ_S , Fehlerschätzer $-\mathcal{I}_Q$ und exakte Fehler für Beispiel 6.1 mit $\theta_1 = 0,3$ und $\theta_2 = 0,2$

des Energiefunktional J berechnen. Durch Anwendung der Polarkoordinaten und Transformationssatz der Integration erhalten wir

$$J(u) \approx 0,5.$$

In Tabelle 6.2 sind die Ergebnisse der adaptiven Verfeinerung des Problems mit den Parametern $\theta_1 = \theta_2 = 0,3$ dargestellt, die mit der Funktion `start_example_2.m` erzeugt werden können. Diese Ergebnisse sind auch in Abbildung 6.6 im Diagramm dargestellt.

Die Abbildungen 6.4 und 6.5 zeigen die Lösung in der Verfeinerungsstufe 7 und zwei verfeinerte Gitter. Wir können daran erkennen, dass, wie erwartet, gerade um die Singularität im Ursprung eine starke Netzverfeinerung stattfindet. In diesem Bereich ist zudem kein Kontakt mit dem Hindernis vorhanden, was die adaptive Verfeinerung nochmals untermauert.

Insgesamt beschreiben die Ergebnisse grundlegend dasselbe Verhalten, wie wir schon in Beispiel 6.1 erkennen konnten.

6. Validierung

Stufe	Adaptive Verfeinerung				Uniforme Verfeinerung	
	$ \mathcal{N} $	$\rho_S(\varepsilon_V)$	$-\mathcal{I}_Q(\varepsilon_V)$	$-\mathcal{I}(e)$	$ \mathcal{N} $	$-\mathcal{I}(e)$
1	65	0.3926	0.1963	4.6323	65	0.4288
2	83	0.3081	0.1560	1.0978	225	0.2164
3	134	0.1777	0.0894	0.2667	833	0.0669
4	215	0.1136	0.2713	0.0572	3201	0.0242
5	332	0.0704	0.1949	0.0355	12545	0.0183
6	503	0.0469	0.1282	0.0235	49665	0.0078
7	1315	0.0169	0.0948	0.0085	197633	—
8	5181	0.0074	0.0497	0.0039		
9	20569	0.0051	0.0238	0.0020		
10	81968	0.0034	0.0112	0.0013		

Tabelle 6.2: Vergleich von adaptiver ($\theta_1 = \theta_2 = 0,3$) und uniformer Verfeinerung für Beispiel 6.2 mit Angabe des Freiheitsgrades, a posteriori Fehlerschätzer und exaktem Fehler

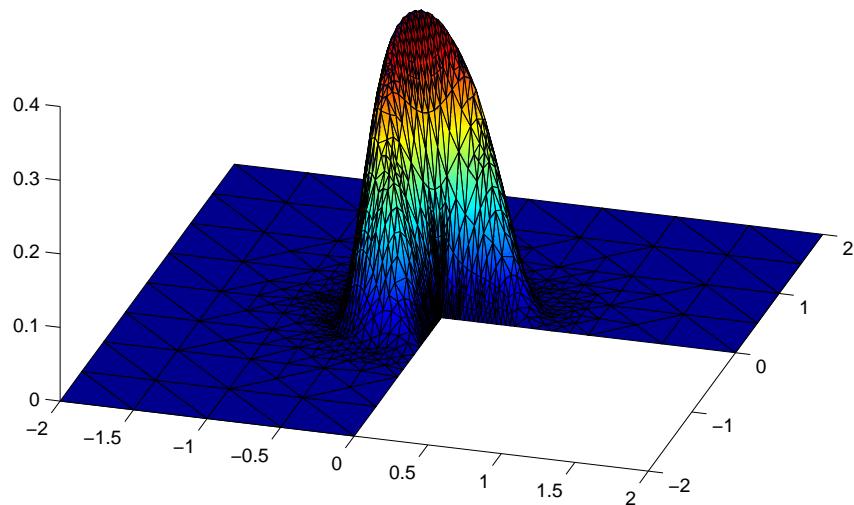


Abbildung 6.4: Numerische Lösung des Beispiels 6.2 in der Verfeinerungsstufe 7 mit $\theta_1 = \theta_2 = 0,3$

6. Validierung

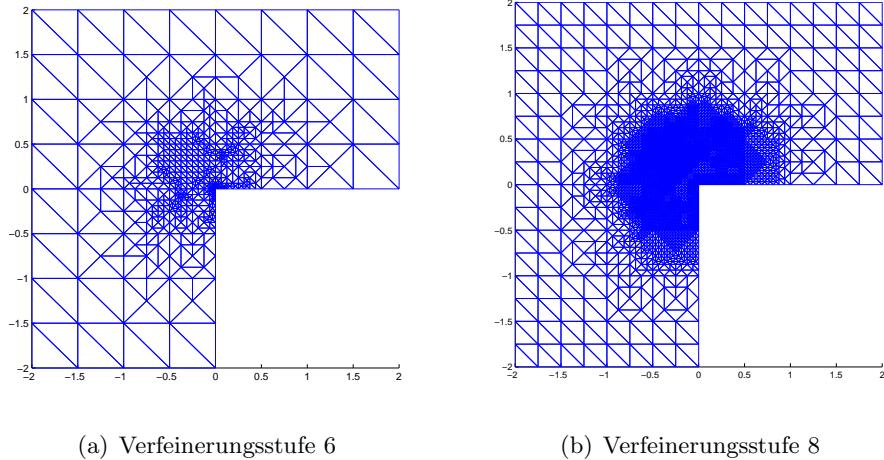


Abbildung 6.5: Netzverfeinerungen für das Beispiel 6.2 mit $\theta_1 = \theta_2 = 0,3$

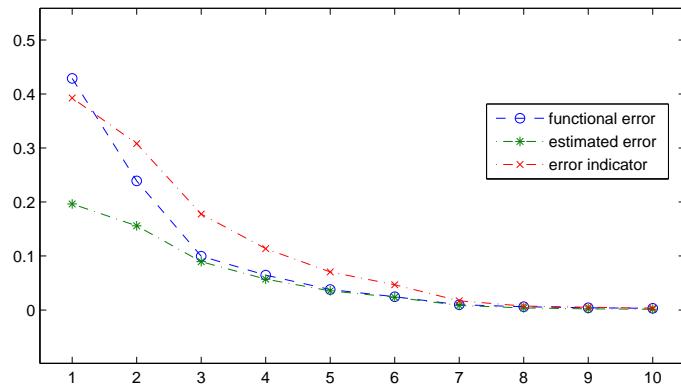


Abbildung 6.6: Fehlerindikator ρ_S , Fehlerschätzer $-\mathcal{I}_Q$ und exakten Fehler $-\mathcal{I}(e)$ für Beispiel 6.2 mit $\theta_1 = 0,3$ und $\theta_2 = 0,3$

Beispiel 6.3. Als letztes Beispiel für ein affines Hindernisproblem können wir das Beispiel 6.2 noch erweitern, indem wir als affines Hindernis nicht die Nullfunktion, sondern eine umgedrehte Pyramide verwenden, die gegeben wird durch

$$\psi(x) := 0,5 (\text{dist}(x, \partial[-2, 2]^2) - 2,01), \quad x \in \bar{\Omega},$$

während alle übrigen Eingabedaten gleich bleiben. In Abbildung 6.7 können wir das Hindernis gut an der Ecke des Gebietes Ω erkennen, wenn wir diese mit der Lösung von Beispiel 6.2 aus Abbildung 6.4 vergleichen.

Da für dieses Problem keine exakte Lösung bekannt ist, berechnen wir uns einen Referenzwert für den Wert $J(u)$, indem wir das Problem für ein engmaschiges Gitter ($h = 0,05$) berechnen. Damit ergibt sich

$$J(u) \approx -0,8250.$$

In den Abbildungen 6.7 und 6.8 sind wieder die Lösung und verschiedene Verfeinerungsstufen vom Gitter für das gegebene Problem mit den Parametern $\theta_1 = \theta_2 = 0,3$ dargestellt, die mit der Datei `start_example_3.m` erzeugt werden können. Weiter sind in der Tabelle 6.3 die Daten aus dem Diagramm der Abbildung 6.9 aufgeführt.

Auch in diesem Beispiel kann man die grundlegende Entwicklung des Fehlerschätzers bzw. Fehlers im Funktional gut erkennen. An den Verfeinerungsstufen kann man deutlich sehen, dass erneut am Ursprung eine starke Verfeinerung stattfindet (s. die Singularität aus Beispiel 6.2) und zudem ist am Rand eine feinere Triangulierung zu erkennen. Dies kann daran liegen, dass hier eine starke Veränderung in der Funktion (vgl. Abbildung 6.7) vorliegt und daher viele Informationen verwertet werden müssen.

Stufe	Adaptive Verfeinerung				Uniforme Verfeinerung	
	$ \mathcal{N} $	$\rho_S(\varepsilon_V)$	$-\mathcal{I}_Q(\varepsilon_V)$	$-\mathcal{I}(e)$	$ \mathcal{N} $	$-\mathcal{I}(e)$
1	65	0.7565	0.4109	0.6409	65	0.6409
2	97	0.6922	0.3464	0.3423	225	0.2826
3	196	0.4652	0.2327	0.1566	833	0.0858
4	293	0.3439	0.1721	0.1094	3201	0.0333
5	518	0.2297	0.1150	0.0597	12545	0.0192
6	717	0.1672	0.0837	0.0460	49665	—
7	1362	0.0999	0.0500	0.0354		
8	5237	0.0426	0.0213	0.0229		
9	20529	0.0189	0.0095	0.0192		

Tabelle 6.3: Vergleich von adaptiver ($\theta_1 = \theta_2 = 0,3$) und uniformer Verfeinerung für Beispiel 6.3 mit Angabe des Freiheitsgrades, a posteriori Fehlerschätzer und exaktem Fehler

6. Validierung

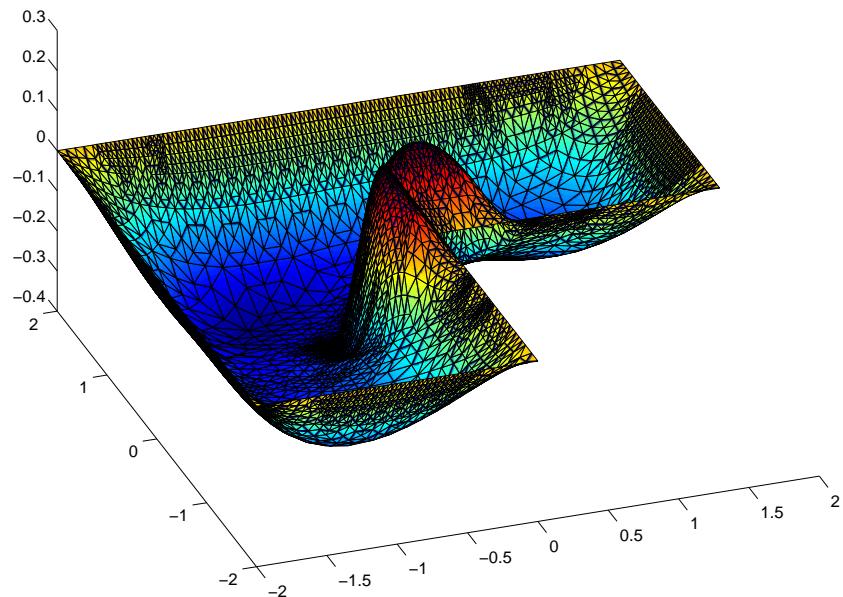
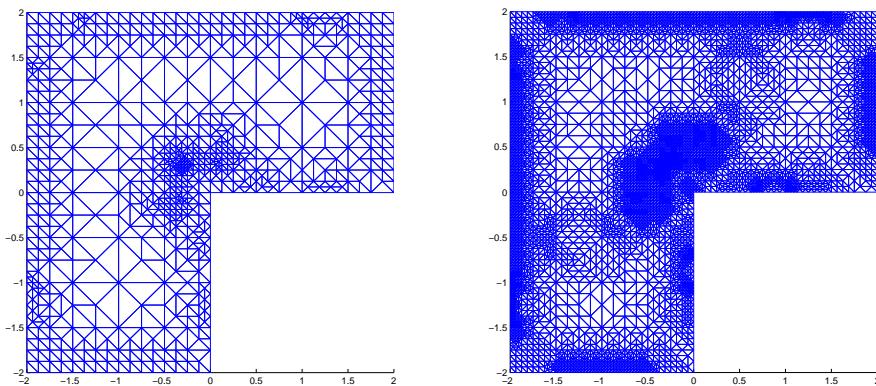


Abbildung 6.7: Numerische Lösung des Beispiels 6.3 mit $\theta_1 = \theta_2 = 0,3$



(a) Verfeinerungsstufe 6

(b) Verfeinerungsstufe 8

Abbildung 6.8: Netzverfeinerungen für das Beispiel 6.3 mit $\theta_1 = \theta_2 = 0,3$

6. Validierung

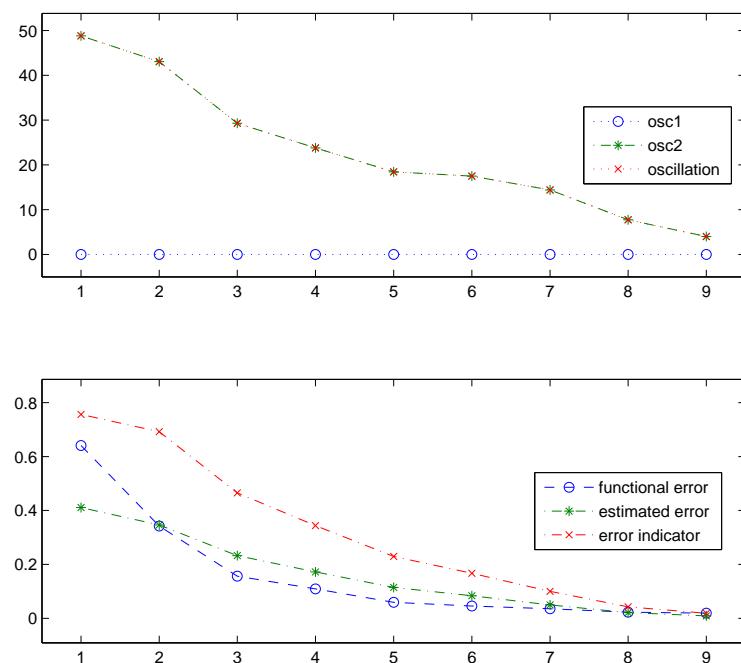


Abbildung 6.9: Fehlerindikator ρ_S , Fehlerschätzer $-\mathcal{I}_Q$ und exakten Fehler $-\mathcal{I}(e)$ für Beispiel 6.3 mit $\theta_1 = 0, 3$ und $\theta_2 = 0, 3$

6.2 Numerisches Beispiel zum Kontaktproblem

Beispiel 6.4 (Hertz'sches Kontaktproblem). Beim Hertz'schen Kontaktproblem betrachten wir einen Zylinder, der auf eine Ebene gepresst wird (vgl. Abbildung 6.10). Da die Höhe des Zylinders viel größer als der Durchmesser ($d = 2$) angenommen werden kann, können wir hier das Prinzip des ebenen Verzerrungszustandes (vgl. Kapitel 2.5.3) anwenden.

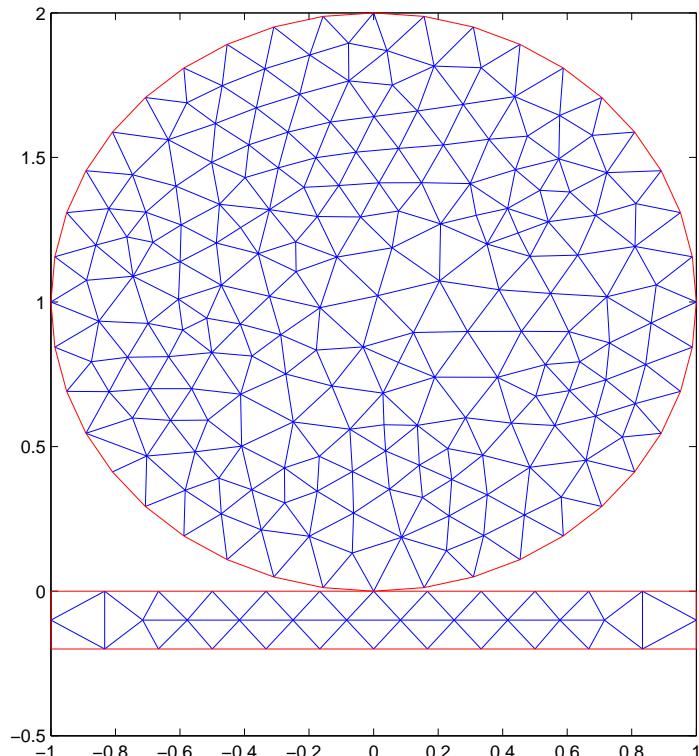


Abbildung 6.10: Initiales Gitter für das Hertz'sche Kontaktproblem mit $h_{\max} = 0,17$

Wir untersuchen dieses Beispiel (vgl. [CSW99] Beispiel 8.1) für einen Zylinder mit Elastizitätsmodul $E = 7000$ und Poissonzahl $\nu = 0,3$. Die Ebene soll steifer sein, d.h. sie hat das Elastizitätsmodul $E = 10^6$ und die Poissonzahl $\nu = 0,45$. Damit lassen sich die Lamé-Konstanten λ und μ für die verschiedenen Teilmengen des Gebietes berechnen und wir können mit dem Hooke'sche Gesetz (2.33) den Zusammenhang zwischen Spannung σ und Verzerrung ϵ berechnen. Weiter sei der Zylinder mit einer Punktladung

6. Validierung

$F = 100$ am obersten Punkt belastet. Damit jedoch am oberen Rand keine Singularität entsteht, verteilt man die Punktladung auf mehrere Knoten am Rand.

Dies führt zu der Problematik, dass die lokale Aufteilung (4.92) von ρ_S für die einzelnen Knotenbelastungen nicht angewendet werden kann. Damit gilt

$$\rho_S(\varepsilon_v) \neq \sum_{p \in \mathcal{N}} \rho_p(\varepsilon_v).$$

Dennoch kann man an den Ergebnissen aus Tabelle 6.4 erkennen, dass der Algorithmus 4.1 auch auf das Hertz'sche Kontaktproblem übertragbar ist. Dies ist darin begründet, dass in jedem Verfeinerungsschritt immer derselbe Faktor (abhängig von dem Wert des Fehlerindikators) zwischen der linken und rechten Seite fehlt.

Da der exakte Fehler nicht bekannt ist, berechnen wir ihn hier auch mittels eines feinen Gitters und erhalten

$$J(\mathbf{u}) \approx -2,29.$$

An den Ergebnissen aus Tabelle 6.4 bzw. Abbildung 6.11 kann man die Verringerung des Fehlers grundlegend in jedem Verfeinerungsschritt erkennen. Nur im ersten Schritt steigt zunächst der Fehler leicht an, was daran liegen kann, dass sich die Oszillationen in jenem Verfeinerungsschritt nicht verringern. Daher wäre es sinnvoll, den Code noch um die Oszillationsterme zu erweitern. Man kann auch deutlich erkennen, dass die adaptive Verfeinerung mit dem Parameter $\theta = 0,35$ einen geringeren Anstieg des Freiheitsgrades in jedem Verfeinerungsschritt aufweist als die uniforme Verfeinerung.

Für das Hertz'sche Kontaktproblem kann es sinnvoll sein, als Vergleichsparameter für die Genauigkeit der Lösung nicht den Wert des Energiefunktionalen zu nehmen, sondern den Wert der Normalenspannung in der Kontaktfläche, da dieser sich exakt (vgl. [Wri06], Kapitel 14.6.1) berechnen lässt durch

$$p_{\max} = \sqrt{\frac{F}{\pi r} \frac{E}{(1+\nu)(1-\nu)}}.$$

Diesbezüglich wäre es auch interessant, den Spannungsverlauf innerhalb des Zylinders zu betrachten. Dieser sollte sich achsensymmetrisch zur y -Achse entwickeln, wenn auch das erzeugte Gitter nahezu symmetrisch zur y -Achse liegt. Dieser Sachverhalt kann ausblickend noch implementiert werden.

In der Abbildung 6.12 sind verschiedene adaptiv erzeugte Gitter zum Parameter $\theta = 0,35$ abgebildet und in Abbildung 6.13 können wir die x - und y -Komponente des Verschiebungsfeldes \mathbf{u}_S einsehen. Hier ist zu erkennen, dass der Zylinder sich erwartungsgemäß durch die Stauchung in y -Richtung in x -Richtung ausdehnt.

6. Validierung

Stufe	Adaptive Verfeinerung				Uniforme Verfeinerung	
	$ \mathcal{N} $	$\rho_S(\epsilon_V)$	$-\mathcal{I}_Q(\epsilon_V)$	$-\mathcal{I}(e)$	$ \mathcal{N} $	$-\mathcal{I}(e)$
1	243	0.6085	0.3042	0.0681	243	0.0681
2	286	0.4091	0.2045	0.1522	901	0.0814
3	355	0.2567	0.1301	0.1221	3465	0.0411
4	594	0.1277	0.0646	0.0802	13585	0.0190
5	2266	0.0509	0.0256	0.0396		
6	6644	0.0205	0.0103	0.0185		
7	26249	0.0082	0.0041	0.0066		

Tabelle 6.4: Vergleich von adaptiver ($\theta = 0,35$) und uniformer Verfeinerung für Beispiel 6.4 mit Angabe des Freiheitsgrades, a posteriori Fehlerschätzer und exaktem Fehler

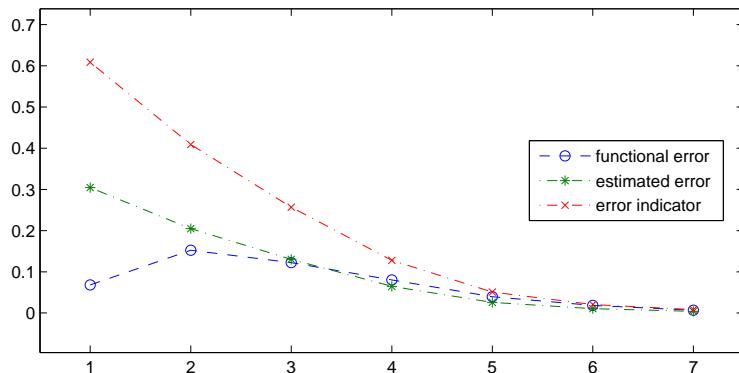


Abbildung 6.11: Fehlerindikator ρ_S , Fehlerschätzer $-\mathcal{I}_Q$ und exakten Fehler $-\mathcal{I}(e)$ für Beispiel 6.4 mit $\theta = 0,35$

Es ist sinnvoll zu erwähnen, dass die vorliegend implementierte Gap-Funktion stückweise linear ist, auch wenn der Zylinder krummlinig ist. Damit ist dieses Beispiel auch konform zu den im Kapitel 4 hergeleiteten Ergebnissen. Die stückweise Lineararität ist darin begründet, dass die Gap-Funktion nur punktweise am Rand des Zylinders ausgewertet wird und der Körper, der mit dem Zylinder in Kontakt steht, eben ist.

6. Validierung

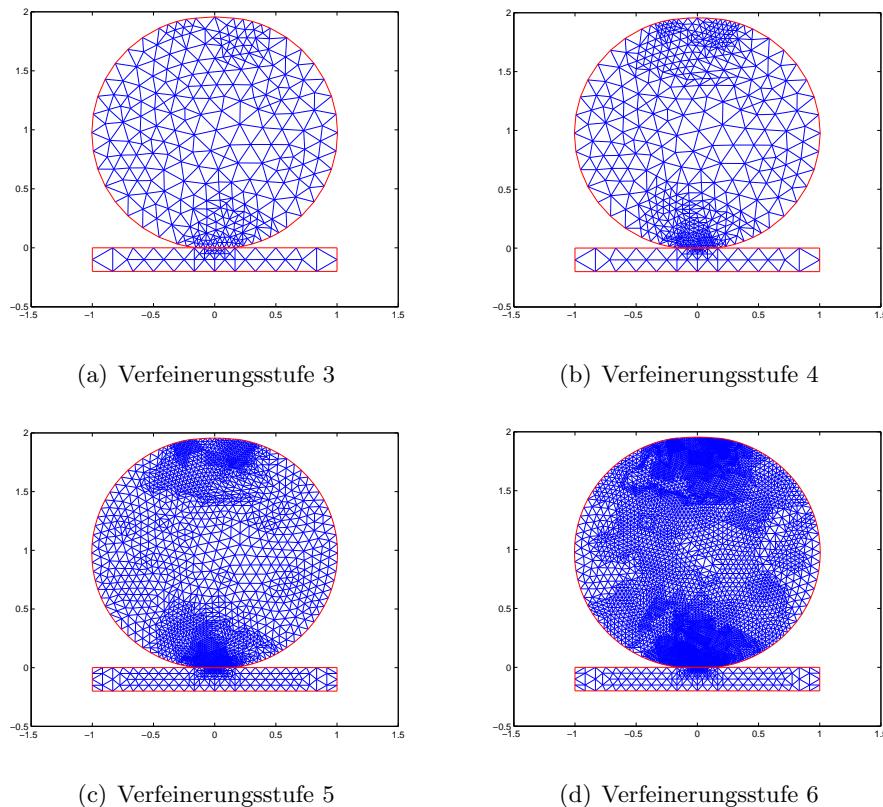


Abbildung 6.12: Netzverfeinerungen für das Beispiel 6.4 mit $\theta = 0,35$

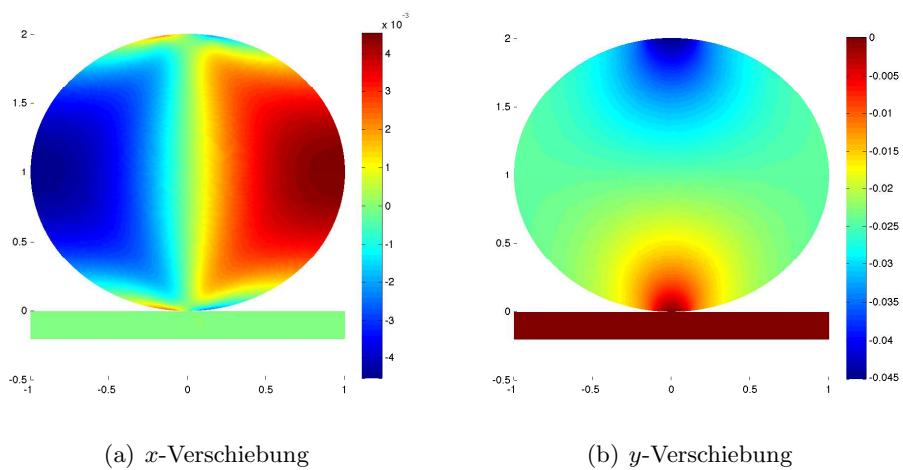


Abbildung 6.13: Abbildung der x - und y -Komponenten des Verschiebungsfeldes von Beispiel 6.4 mit $\theta = 0,35$

Kapitel 7

Zusammenfassung und Ausblick

Adaptive Verfeinerungsstrategien ermöglichen für partielle Differentialgleichungen mit Nebenbedingung eine gute Steuerung der Netzverfeinerung, um hinreichend genaue Ergebnisse bei möglichst geringem Aufwand zu erhalten.

Eine solche Verfeinerungsstrategie haben wir in der vorliegendem Arbeit für einen hierarchischen a posteriori Fehlerschätzer für Hindernisprobleme untersucht. In der Theorie konnten wir in Kapitel 4.1 zeigen, dass der von uns betrachtete Fehlerschätzer eine obere Schranke bzgl. des exakten Fehlers bis auf Addition von Termen höherer Ordnung, den Oszillationstermen, darstellt. Durch die Implementierung (s. Anhang D.1) und Auswertung in Matlab im Kapitel 6.1 konnte dies bestätigt werden. Weiter haben wir in Kapitel 6.2 das Hertz'sche Kontaktproblem untersucht, auf das wir die Konzepte des hergeleiteten hierarchischen Fehlerschäters übertragen haben (vgl. Kapitel 4.4). Hierbei konnte man sehen, dass die, bzgl. des Schätzers, erzeugten Verfeinerungen grundlegend zu einer hinreichenden Verbesserung der Lösung geführt haben.

Abschließend lässt sich somit feststellen, dass der hergeleitete a posteriori Fehlerschätzer auf Hindernisprobleme angewendet werden kann und es sinnvoll ist die theoretischen Grundlagen aufgrund der Ergebnisse aus Kapitel 6.2 bzgl. Kontaktproblemen zu erweitern.

Um eine Erweiterung der theoretischen Grundlagen auf Kontaktprobleme für den hierarchischen a posteriori Fehlerschätzer aus Kapitel 4.1 herzuleiten, kann man grundlegend analog vorgehen. Die lokale Aufteilung des Fehlerindikators und die Oszillationsterme sind in Kapitel 4.4 schon übertragen worden. Die Resultate für die lokalen Projektionen aus Lemma 4.19 und 4.20 sind komponentenweise auf das Verschiebungsfeld \mathbf{u} übertragbar und können damit auch insgesamt auf den zweidimensionalen Fall bezogen werden. Um jedoch jetzt ein ähnliches Vorgehen wie in Lemma 4.21

7. Zusammenfassung und Ausblick

anwenden zu können, müssen auch die KKT-Bedingungen (4.22) auf den zweidimensionalen Fall übertragen werden, damit diese dann in den einzelnen Fällen der disjunkten Zerlegung der Knoten \mathcal{N} aus Lemma 4.21 angewendet werden können. Hierbei zeigt sich jedoch die Schwierigkeit, dass die Nebenbedingung im Kontaktproblem für das zweidimensionale Verschiebungsfeld nur in eine Dimension (nämlich der Normalenrichtung bzgl. des Randes $\partial\Omega$) gilt. Dies bedeutet, dass wir die Bedingungen (4.22) nicht komponentenweise und damit auch nicht, wie in Kapitel 4.1 vorgestellt, durch Addition einer Hutfunktion ϕ_p herleiten können, da im Kontaktfall die Folgerung davon abhängig ist, auf welchem Kontaktstrand $\Gamma_c^i, i = 1, 2$, sich der Punkt p befindet. Weiter erzeugt sich, da nur eine Teilmenge von Ω die Nebenbedingung für den Kontakt erfüllen muss, eine andere disjunkte Vereinigung als in Lemma 4.21 verwendet. Es lässt sich also vermuten, dass die grundlegende Schwierigkeit in der Übertragung der Theorie auf den Kontaktfall in der Kontaktbedingung liegt.

In der vorliegenden Arbeit sind wir von linear elastischen Materialien ausgegangen. Eine interessante Verallgemeinerung der Anwendung des hierarchischen Fehlerschätzers stellt daher beispielsweise die Betrachtung von hyperelastischen oder auch plastischen Verformungen dar (vgl. auch [Wri06]). Hierfür sind allgemeinere Prinzipien aus der Kontinuumsmechanik (vgl. [Alt12]) und der nichtlinearen Finite-Elemente-Methode (vgl. [Wri01]) notwendig.

Da der in dieser Arbeit betrachtete Fehlerschätzer in lokale Anteile bzgl. der Knoten \mathcal{N} aufgeteilt wird, wäre es interessant zu untersuchen, ob eine eigene Verfeinerungsmethode, die auf einem Bisectionsalgorithmus beruht, bessere Verfeinerungen erzeugt. Nach der Auswahl der zu verfeinernden Knoten, werden in der vorliegenden Implementierung diejenigen Elemente gesucht, in denen die ausgewählten Knoten enthalten sind. Da dann in der Funktion `refinemesh` zuzüglich weitere Elemente verfeinert werden, um eine konforme Zerlegung zu garantieren, kann somit eine stärkere Verfeinerung stattfinden, als gewünscht ist. Der Bisectionsalgorithmus beruht darauf, dass die ausgewählten Dreiecke halbiert werden und kann insofern modifiziert werden, dass wir direkt nach der Auswahl der zu verfeinernden Knoten von diesen eine Winkelhalbierende zur gegenüberliegenden Seite ziehen. Mit einer Fallunterscheidung, in welchem Element, wie viele Knoten zur Verfeinerung gewählt wurden, kann man diesen Algorithmus noch weiter verbessern, indem man die Verfeinerungsstrategie aus Abbildung 2.6 implementiert.

Literaturverzeichnis

- [Alt12] ALTBACH, Holm: *Kontinuumsmechanik*. 2. Auflage. Springer, 2012
- [BCH05] BARTELS, S. ; CARSTENSEN, C. ; HECHT, A.: 2D isoparametric FEM in MATLAB / Humboldt-Universität, Berlin. 2005. – Forschungsbericht
- [BCH07] BRAESS, D. ; CARSTENSEN, C. ; HOPPE, R.: Convergence analysis of a conforming adaptive finite element method for an obstacle problem. In: *Numerische Mathematik* 107 (2007), S. 455–471
- [BCH09] BRAESS, D. ; CARSTENSEN, C. ; HOPPE, R.: Error reduction in adaptive finite element approximation of elliptic obstacle problems. In: *Journal of Computational Mathematics* 27 (2009), Nr. 2-3, S. 148–169
- [Bra05] BRAESS, Dietrich: A Posteriori Error Estimators for Obstacle Problems – Another Look / Faculty of Mathematics, Ruhr-University. 2005. – Forschungsbericht
- [Bra13] BRAESS, Dietrich: *Finite Elemente – Theorie, schnelle Löser und Anwendungen in der Elastizitätstheorie*. 5. Auflage. Springer-Verlag, 2013
- [CSW99] CARSTENSEN, C. ; SCHERF, O. ; WRIGGERS, P.: Adaptive finite elements for elastic bodies in contact. In: *SIAM J. Sci. Comput.* 20 (1999), Nr. 5, S. 1605–1626
- [DLY89] DEUFLHARD, P. ; LEINEN, P. ; YSERENTANT, H.: Concepts of an Adaptive Hierarchical Finite Element Code. In: *Impact of Computing in Science and Engineering* 1 (1989), S. 3–35
- [Fal74] FALK, Richard S.: Error estimates for the approximation of a class of variational inequalities. In: *Math. Comp.* 28 (1974), S. 963–971
- [Fis05] FISCHER, Gerd: *Lineare Algebra*. 15. Auflage. 2005

- [Glo08] GLOWINSKI, Roland: *Numerical methods for nonlinear variational problems*. Reprint. Springer, 2008
- [GRT09] GÖPFERT, A. ; RIEDRICH, T. ; TAMMER, C.: *Angewandte Funktionalanalysis*. Vieweg und Teubner, 2009
- [HH80] HASLINGER, J. ; HLAVÁČEK, I.: Contact between elastic bodies. I. Continuous problems. In: *Apl. Mat.* 25 (1980), S. 324–347
- [HHNL80] HLAVÁČEK, I. ; HASLINGER, J. ; NECAS, J. ; LOVÍSEK, J.: *Solution of Variational Inequalities in Mechanics*. 9. Auflage. Springer, 1980
- [HJ99] HANSBO, P. ; JOHNSON, C.: Adaptive Finite Element Methods For Elastic Contact Problems. In: *Grid Generation and Adaptive Algorithms* (1999)
- [HK92] HOPPE, R. ; KORNHUBER, R.: Adaptive Multilevel-Methods for Obstacle Problems. In: *Preprint SC 91-16* (1992), April
- [Joh92] JOHNSON, Claes: Adaptive finite element methods for the obstacle problem. In: *Math. Models Methods Appl. Sci.* 2 (1992), Nr. 4, S. 483–487
- [KO88] KIKUCHI, N. ; ODEN, J.T.: *Contact Problems in Elasticity: A Study of Variational Inequalities and Finite Element Methods*. SIAM, 1988
- [KZ11] KORNHUBER, Ralf ; ZOU, Qingsong: Efficient and reliable hierarchical error estimates for the discretization error of elliptic obstacle problems. In: *Mathematics of Computation* 80 (2011), Nr. 273, S. 69–88
- [Kö00] KÖNIGSBERGER, Konrad: *Analysis 2*. 5. Auflage. Springer, 2000
- [MNS00] MORIN, P. ; NOCHETTO, R.H. ; SIEBERT, K.G.: Data Oscillation and convergence of adaptive FEM. In: *SIAM J. Numer. Anal.* 38 (2000), Nr. 2, S. 466–488
- [NW06] NOCEDAL, Jorge ; WRIGHT, Stephen J.: *Numerical Optimization*. 2. ed. New York, NY : Springer, 2006
- [Pag10] PAGE, M.: Schätzerreduktion und Konvergenz adaptiver FEM für Hindernisprobleme / Universität Wien. 2010. – Masterarbeit
- [QSS02] QUARTERONI, A. ; SACCO, R. ; SALERI, F.: *Numerische Mathematik 2*. 1. Auflage. Springer, 2002

Literaturverzeichnis

- [Rud91] RUDIN, Walter: *Functional Analysis*. 2. Auflage. McGraw-Hill, 1991
- [Sch] SCHNEIDER, Rene: *Beispiele für Gauß-Integration im Mehrdimensionalen*. – https://www-user.tu-chemnitz.de/~rens/lehre/archiv/numerik1_11SS/folien/gaussxd.pdf
- [Sta08] STARKE, Gerhard: Numerik partieller Differentialgleichungen / IFAM - Universität Hannover. 2008. – Vorlesungsskript
- [Sta11] STARKE, Gerhard: Variationsungleichungen / IFAM - Universität Hannover. 2011. – Vorlesungsskript
- [Ste12a] STEPHAN, Ernst P.: Contact Problems – Numerical Analysis and Implementation / IFAM - Universität Hannover. 2012. – Vorlesungsskript
- [Ste12b] STEPHAN, Ernst P.: Numerik partieller Differentialgleichungen I / IFAM - Universität Hannover. 2012. – Vorlesungsskript
- [Sto99] STOER, Josef: *Numerische Mathematik I*. 8. Auflage. Springer, 1999
- [SV07] SIEBERT, K.G. ; VEESER, A.: A Unilaterally Constrained Quadratic Minimization with Adaptive Finite Elements. In: *SIAM J. Optim.* 18 (2007), Nr. 1, S. 260–289
- [Wal11] WALKER, Christoph: Partielle Differentialgleichungen / IFAM - Universität Hannover. 2011. – Vorlesungsskript
- [Wer11] WERNER, Dirk: *Funktionalanalysis*. 7. Auflage. Springer, 2011
- [Wri01] WRIGGERS, Peter: *Nichtlineare Finite-Element-Methoden*. 5. Auflage. Springer, 2001
- [Wri06] WRIGGERS, Peter: *Computational Contact Mechanics*. 2. Auflage. Springer, 2006
- [Wri09] WRIGGERS, Peter: Finite-Elemente-Methode / IKM - Universität Hannover. 2009. – Vorlesungsskript
- [Zha07] ZHANG, Yongmin: Convergence of free boundaries in discrete obstacle problems. In: *Numerische Mathematik* (2007), Nr. 106, S. 157–164
- [Zou11] ZOU, Qingsong: Efficient and reliable hierarchical error estimates for an elliptic obstacle problem. In: *Applied Numerical Mathematics* 61 (2011), S. 344–355

Literaturverzeichnis

- [ZVKG11] ZOU, Q. ; VEESER, A. ; KORNHUBER, R. ; GRÄSER, C.: Hierarchical error estimates for the energy functional in obstacle problems. In: *Numerische Mathematik* (2011), Nr. 117, S. 653–677

Anhang A

Funktionalanalysis

A.1 Sobolev-Räume

Sei im Weiteren $\emptyset \neq \Omega \subset \mathbb{R}^n$. Wir definieren den Sobolev-Raum allgemein wie folgt (vgl. [Bra13] Kapitel II, §2 und [Wal11] Kapitel 6).

Definition A.1. Seien $1 \leq p \leq \infty$ und $m \in \mathbb{N}$. Die Menge

$$W_p^m(\Omega) := \left(\{u \in L_p(\Omega) \mid \partial^\alpha u \in L_p(\Omega) \forall |\alpha| \leq m\}, \|\cdot\|_{W_p^m} \right)$$

heißt *Sobolev-Raum* der Ordnung m . Dabei ist

$$\|u\|_{W_p^m} := \|u\|_{W_p^m(\Omega)} := \left(\sum_{|\alpha| \leq m} \|\partial^\alpha u\|_{L_p}^p \right)^{\frac{1}{p}},$$

wenn $1 \leq p < \infty$. Im Fall $p = \infty$ ist $\|u\|_{W_p^m} := \max_{|\alpha| \leq m} \|\partial^\alpha u\|_\infty$.

Weiterhin bezeichne $L_p(\Omega)$ den *Lebesgue-Raum*, d.h. den Raum der messbaren Funktionen, deren p -te Potenz Lebesgue-integrierbar über Ω ist, d.h.

$$L_p(\Omega) := \left(\{u : \Omega \rightarrow \mathbb{R} \mid f \text{ messbar}, \|\cdot\|_{L_p} < \infty\}, \|\cdot\|_{L_p} \right),$$

wobei $\|u\|_{L_p} := \|u\|_{L_p(\Omega)} = \|u\|_{W_p^0}$.

Definition A.2. Der Raum

$$\mathcal{D}(\Omega) := C_c^\infty(\Omega) = \{\varphi \in C^\infty(\Omega) \mid \text{supp}(\varphi) \subset\subset \Omega\}$$

heißt der *Raum der Testfunktionen*, wobei $K \subset\subset \Omega \Leftrightarrow \bar{K} \subset \Omega$ kompakt.

Bemerkung A.3. Seien $u \in W_p^m(\Omega)$, $\varphi \in \mathcal{D}(\Omega)$ und $\alpha \in \mathbb{N}^n$ mit $|\alpha| \leq m$. Dann bezeichnen wir $v = \partial^\alpha u$ als *schwache Ableitung* von u , wenn gilt

$$\int_{\Omega} v \cdot \varphi \, dx = (-1)^{|\alpha|} \int_{\Omega} u \cdot \partial^\alpha \varphi \, dx.$$

Beispiel A.4. Es sei $\Omega = (-1, 1) \subset \mathbb{R}$ und $u(x) = |x| \in L_2(\Omega)$. Betrachten wir $v(x) = \text{sign}(x)$, so ergibt sich für $\varphi \in \mathcal{D}(\Omega)$

$$\begin{aligned}\int_{\Omega} v \cdot \varphi \, dx &= \int_{-1}^0 -1 \cdot \varphi(x) \, dx + \int_0^1 1 \cdot \varphi(x) \, dx \\ &= -x\varphi(x)\Big|_{-1}^0 - \int_{-1}^0 -x\varphi'(x) \, dx + x\varphi(x)\Big|_0^1 - \int_0^1 x\varphi'(x) \, dx \\ &= - \int_{-1}^1 |x|\varphi'(x) \, dx = (-1)^1 \int_{\Omega} u \cdot \varphi' \, dx,\end{aligned}$$

da $\varphi(-1) = \varphi(1) = 0$. Also ist $v = \partial u$ und somit $u \in W_2^1(\Omega)$. Analog kann man nachrechnen, dass

$$\int_{\Omega} v \cdot \varphi' \, dx = -2\varphi(0)$$

ist und somit u nicht zweimal schwach ableitbar ist, d.h. $u \notin W_2^2(\Omega)$.

Wir wollen in der Theorie der Finiten Elemente Methode vor allem Sobolev-Räume über dem Raum $L_2(\Omega)$ betrachten, daher ist folgender Satz essentiell.

Satz A.5. Es seien $1 \leq p \leq \infty$ und $m \in \mathbb{N}$. Dann gilt:

- (a) $W_p^m(\Omega)$ ist ein Banachraum.
- (b) $H^m(\Omega) := W_2^m(\Omega)$ ist ein Hilbertraum mit Skalarprodukt

$$(u, v)_m := (u, v)_{H^m(\Omega)} := \sum_{|\alpha| \leq m} (\partial^\alpha u, \partial^\alpha v)_0 \quad \forall u, v \in H^m(\Omega),$$

wobei

$$(u, v)_0 := (u, v)_{L_2(\Omega)} := \int_{\Omega} uv \, dx.$$

Beweis. Der Beweis ist unter anderem in [Wal11] zu finden. \square

Bemerkung A.6. (a) Die Norm auf $H^m(\Omega)$ ergibt sich analog zur Norm des allgemeinen Sobolev-Raumes durch das Skalarprodukt, d.h. $\|u\|_m := \|u\|_{H^m(\Omega)} := \|u\|_{W_2^m}$.

(b) Analog dazu definieren wir die Halbnorm $|\cdot|_m$ auf H^m wie folgt:

$$|u|_m := |u|_{H^m(\Omega)} := \left(\sum_{|\alpha|=m} \|\partial^\alpha u\|_{L_2}^2 \right)^{\frac{1}{2}}.$$

Definition A.7. Der Raum $H_0^m(\Omega)$ ist die Vervollständigung von $\mathcal{D}(\Omega)$ bzgl. der Norm $\|\cdot\|_m$.

Bemerkung A.8. Die Funktionen $u \in H_0^m(\Omega)$ können als die Funktionen $u \in H^m(\Omega)$ mit $u = 0$ auf $\partial\Omega$ aufgefasst werden. Weiter ist $H_0^m(\Omega)$ ein abgeschlossener Unterraum von $H^m(\Omega)$ (vgl. auch [Wal11] Bemerkung 6.7).

Theorem A.9 (Spursatz). *Es sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ und C^2 . Dann gilt für $1 < p < \infty$, dass ein $c > 0$ existiert mit*

$$\|u|_{\partial\Omega}\|_{L_p(\partial\Omega)} \leq c \|u\|_{W_p^1(\Omega)}$$

für alle $u \in C^\infty(\bar{\Omega})$.

Die Restriktion $[u \mapsto u|_{\partial\Omega}]$ lässt sich also eindeutig stetig zum Spuroperator $\gamma_0 \in \mathcal{L}(W_p^1(\Omega), L_p(\partial\Omega))$ fortsetzen.

Beweis. Der Beweis ist unter anderem in [Wal11] aufgeführt. □

A.2 Optimalitätskriterien

Zunächst definieren wir einen verallgemeinerten Begriff der Richtungsableitung, der auch auf unendlich dimensionalen Vektorräumen existiert.

Definition A.10. Es seien V ein Vektorraum, $M \subset V$ und W ein normierter Raum, sowie $F : M \rightarrow W$ eine Abbildung, $x_0 \in M$ und $v \in V$. Dann heißt F Gâteaux-differenzierbar (bzw. in Richtung v an der Stelle x_0 differenzierbar), falls es ein $\varepsilon > 0$ mit $[x_0 - \varepsilon v, x_0 + \varepsilon v] \subset M$ gibt und der Grenzwert

$$\mathcal{D}_v F(x_0) := \frac{d}{dt} F(x_0 + tv) \Big|_{t=0} := \lim_{t \rightarrow 0} \frac{F(x_0 + tv) - F(x_0)}{t} \quad (\text{A.1})$$

in W existiert. $\mathcal{D}_v F(x_0)$ heißt dann Gâteaux-Ableitung von F an der Stelle x_0 in Richtung v .

Falls wir nur $[x_0, x_0 + \varepsilon v] \subset M$ voraussetzen, so können wir in (A.1) $\lim_{t \rightarrow 0}$ durch $\lim_{t \rightarrow +0}$ ersetzen. Dann nennen wir (A.1) die rechtsseitige Gâteaux-Ableitung und bezeichnen diese mit $\mathcal{D}_v^+ F(x_0)$.

Für die Variationsrechnung sind folgende zwei Sätze für uns von besonderer Bedeutung.

Satz A.11. (Charakterisierungssatz der konvexen Optimierung) *Es seien $M \subset V$ eine konvexe Menge, V ein Vektorraum und $F : M \rightarrow \mathbb{R}$ ein konvexes Funktional. Dann gilt für $x_0, x \in M$:*

x_0 ist Lösung von $\min_{x \in M} F(x)$ genau dann, wenn für alle $x \in M$ gilt

$$\mathcal{D}_{x-x_0}^+ F(x_0) \geq 0.$$

Beweis. Siehe [GRT09], Kapitel 3.3.3, Satz 3.34. \square

Satz A.12. Es sei $U \subset V$ ein (Unter-)Vektorraum, V ein Vektorraum und $F : U \rightarrow \mathbb{R}$ eine Gâteaux-differenzierbare konvexe Funktion. Dann ist $x_0 \in U$ genau dann Lösung von $\min_{x \in U} F(x)$, wenn für alle $u \in U$ gilt

$$\mathcal{D}_u F(x_0) = 0.$$

Beweis. Siehe [GRT09], Kapitel 3.3.3, Satz 3.35. \square

A.3 Konvergenzbegriffe

Definition A.13. Es sei $m \in \mathbb{N}, 1 \leq p < \infty, 1 = \frac{1}{p} + \frac{1}{p'}$.

(a) Eine Folge (u_j) in L_p konvergiert schwach gegen $u \in L_p(\Omega)$

$$\begin{aligned} &\iff u_j \rightharpoonup u \text{ in } L_p(\Omega) \\ &\iff \forall v \in L_{p'}(\Omega) : \int_{\Omega} u_j v \, dx \longrightarrow \int_{\Omega} u v \, dx \text{ in } \mathbb{K}. \end{aligned}$$

(b) Eine Folge $(u_j) \in W_p^m(\Omega)$ konvergiert schwach gegen $u \in W_p^m(\Omega)$

$$\begin{aligned} &\iff u_j \rightharpoonup u \text{ in } W_p^m(\Omega) \\ &\iff \partial^\alpha u_j \rightharpoonup \partial^\alpha u \text{ in } L_p(\Omega) \forall |\alpha| \leq m. \end{aligned}$$

Bemerkung A.14. Sei $1 \leq p < \infty, m \in \mathbb{N}$, dann ist:

(a) Wenn $u_j \rightarrow u$ in $W_p^m(\Omega)$, dann folgt $u_j \rightharpoonup u$ in $W_p^m(\Omega)$, d.h. „starke Konvergenz ist stärker als schwache Konvergenz“.

Beweis. $\forall v \in L_{p'}(\Omega), |\alpha| \leq m$ gilt

$$\left| \int_{\Omega} (\partial^\alpha u_j - \partial^\alpha u) v \, dx \right| \underset{\text{Hölder}}{\leq} \|v\|_{L_{p'}(\Omega)} \|\partial^\alpha u_j - \partial^\alpha u\|_{L_p(\Omega)} \longrightarrow 0. \quad \square$$

(b) Sei $1 < p < \infty, (u_j) \subset W_p^m(\Omega)$ beschränkt (bzgl. $\|\cdot\|_{W_p^m}$), dann folgt, dass eine Teilfolge $(u_{j'})$ und ein $u \in W_p^m(\Omega)$ existiert, so dass $u_{j'} \rightharpoonup u$ in $W_p^m(\Omega)$, d.h. „beschränkte Folgen sind relativ schwach kompakt“.

Beweis. Vgl. [Rud91]. \square

(c) Es sei $M \subset W_p^m(\Omega)$ konvex und abgeschlossen (bzgl. $\|\cdot\|_{W_p^m}$), sowie $(u_j) \subset M$ mit $u_j \rightharpoonup u$ in $W_p^m(\Omega)$, dann ist $u \in M$, d.h. „abgeschlossene konvexe Mengen sind schwach abgeschlossen“ (Theorem von Mazur; ohne Beweis, vgl. [Rud91]).

- (d) Es sei $u_j \rightharpoonup u$ in $W_p^m(\Omega)$, dann folgt (u_j) ist beschränkt in $W_p^m(\Omega)$ (bzgl. $\|\cdot\|_{W_p^m}$), d.h. „schwach konvergente Folgen sind beschränkt“.

Beweis. Theorem von Mackey, vgl. [Rud91]. □

- (e) $u_j \rightharpoonup u$ in $W_p^m(\Omega)$, $u_j \rightharpoonup v$ in $W_p^m(\Omega)$, dann gilt $u = v$, d.h. „Grenzwerte von schwach konvergenten Folgen sind eindeutig“.

Beweis. Aus dem Hauptsatz der Variationsrechnung folgt die Behauptung. □

- (f) Sei $u_j \rightharpoonup u$ in $W_p^m(\Omega)$, dann folgt $\|u\|_{W_p^m(\Omega)} \leq \liminf \|u_j\|_{W_p^m(\Omega)}$.

Theorem A.15. *In einem reflexiven Raum V , d.h. der Bidualraum V'' ist isomorph zu V , besitzt jede beschränkte Folge $(v_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine schwach konvergente Teilfolge (v_{n_j}) .*

Beweis. Der Beweis befindet sich in [Wer11] Kapitel III, Theorem 3.7. □

Bemerkung A.16. Jeder Hilbertraum H ist reflexiv.

Beweis. Dies folgt aus dem Darstellungssatz von Riesz (Satz 2.15). □

Anhang B

Optimierung

B.1 Quadratische Programmierung

Um im Folgenden die Idee des Algorithmus erläutern zu können, führen wir zunächst grundlegende Begriffe ein. Ein quadratisches Problem (kurz: QP) mit Gleichungs- und Ungleichungsnebenbedingungen ist von der Form

$$\begin{aligned} \min_{\boldsymbol{x}} \quad & q(\boldsymbol{x}) = \frac{1}{2} \boldsymbol{x}^T \boldsymbol{G} \boldsymbol{x} + \boldsymbol{x}^T \boldsymbol{c} \\ \text{s.t.} \quad & \boldsymbol{a}_i^T \boldsymbol{x} = b_i, \quad i \in \mathcal{E}, \\ & \boldsymbol{a}_i^T \boldsymbol{x} \geq b_i, \quad i \in \mathcal{I}, \end{aligned} \tag{B.1}$$

wobei \mathcal{E} und \mathcal{I} die Indexmengen der Gleichungs- und Ungleichungsnebenbedingungen darstellen und $\boldsymbol{c}, \boldsymbol{x}, \boldsymbol{a}_i \in \mathbb{R}^n, b_i \in \mathbb{R}, i \in \mathcal{E} \cup \mathcal{I}$, sowie \boldsymbol{G} eine symmetrische $(n \times n)$ -Matrix ist, welche die Hesse-Matrix des Problems darstellt. Damit ist die Hesse-Matrix konstant und daher das Problem konvex, wenn \boldsymbol{G} positiv semidefinit ist. (Ist \boldsymbol{G} positiv definit, so nennen wir das Problem strikt konvex. Wenn \boldsymbol{G} indefinit ist, ist (B.1) „nicht konvex“.)

Da sonst das quadratische Problem (und damit der Active-Set Algorithmus) zu kompliziert wird, betrachten wir hier nur den konvexen Fall. Für diesen Fall können wir leicht zeigen, dass eine Lösung \boldsymbol{x}^* , die die Bedingungen 1. Ordnung erfüllt, auch globale Lösung des Problems ist (s. Theorem B.1). Anschaulich kann es im indefiniten Fall mehrere optimale Punkte geben, die voneinander getrennt liegen, d.h. die Menge der optimalen Punkte ist nicht zusammenhängend, wodurch das Auffinden des globalen Minimums erschwert wird.

Die notwendigen Bedingungen 1. Ordnung sind die KKT-Bedingungen und können hier angewendet werden, da die Restriktionen und die Zielfunktion stetig differenzierbar sind. Die Lagrangefunktion \mathcal{L} für das quadratische Problem ist

$$\mathcal{L}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{\lambda}) = \frac{1}{2} \boldsymbol{x}^T \boldsymbol{G} \boldsymbol{x} + \boldsymbol{x}^T \boldsymbol{c} - \sum_{i \in \mathcal{I} \cup \mathcal{E}} \lambda_i (\boldsymbol{a}_i^T \boldsymbol{x} - b_i). \tag{B.2}$$

Damit ergeben sich (vgl. [NW06], Theorem 12.1) mit der Menge der aktiven Nebenbedingungen $\mathcal{A}(\mathbf{x}^*) = \{i \in \mathcal{E} \cup \mathcal{I} : \mathbf{a}_i^T \mathbf{x}^* = b_i\}$ die KKT-Bedingungen

$$\begin{aligned}\nabla_{\mathbf{x}} \mathcal{L}(\mathbf{x}^*, \boldsymbol{\lambda}^*) &= G\mathbf{x}^* + \mathbf{c} - \sum_{i \in \mathcal{A}(\mathbf{x}^*)} \lambda_i^* \mathbf{a}_i = 0, \\ \mathbf{a}_i^T \mathbf{x}^* &= b_i, \quad \forall i \in \mathcal{A}(\mathbf{x}^*), \\ \mathbf{a}_i^T \mathbf{x}^* &\geq b_i, \quad \forall i \in \mathcal{I} \setminus \mathcal{A}(\mathbf{x}^*), \\ \lambda_i^* &\geq 0, \quad \forall i \in \mathcal{I} \cap \mathcal{A}(\mathbf{x}^*).\end{aligned}\tag{B.3}$$

Hierbei ist \mathbf{x}^* Lösung von (B.1) und erfüllt die LICQ-Bedingung; $\boldsymbol{\lambda}^*$ ist dazugehöriger optimaler Lagrange-Multiplikator. In (B.3) wird die Komplementaritätsbedingung $\lambda_i^* c_i(\mathbf{x}^*) = 0$ impliziert durch $\lambda_i^* = 0 \forall i \notin \mathcal{A}(\mathbf{x}^*)$.

Theorem B.1. Wenn \mathbf{x}^* die Bedingungen (B.3) erfüllt mit $\lambda_i^*, i \in \mathcal{A}(\mathbf{x}^*)$ und G ist positiv semidefinit, dann ist \mathbf{x}^* eine globale Lösung von (B.1).

Beweis. Wenn \mathbf{x} ein beliebiger weiterer zulässiger Punkt für (1.1) ist, gelten die Restriktionen $\mathbf{a}_i^T \mathbf{x} = b_i, i \in \mathcal{E}$, sowie $\mathbf{a}_i^T \mathbf{x} \geq b_i, i \in \mathcal{I} \cap \mathcal{A}(\mathbf{x}^*)$ für \mathbf{x} und damit gilt zusammen mit der ersten Bedingung von (B.3), dass

$$(\mathbf{x} - \mathbf{x}^*)^T (G\mathbf{x}^* + \mathbf{c}) = \sum_{i \in \mathcal{E}} \underbrace{\lambda_i^* \mathbf{a}_i^T (\mathbf{x} - \mathbf{x}^*)}_{\geq 0} + \sum_{i \in \mathcal{A}(\mathbf{x}^*) \cap \mathcal{I}} \underbrace{\lambda_i^* \mathbf{a}_i^T (\mathbf{x} - \mathbf{x}^*)}_{\geq 0} \geq 0.$$

Dann drücken wir $q(\mathbf{x})$ durch $q(\mathbf{x}^*)$ aus und wenden die obere Ungleichung sowie die positive Semidefinitheit für G an, um zu zeigen, dass $q(\mathbf{x}) \geq q(\mathbf{x}^*)$ ist. Damit ist \mathbf{x}^* globale Lösung des quadratischen Problems. \square

Daher ist im positiv semidefiniten Fall gesichert, dass ein optimaler Punkt auch gleichzeitig globale Lösung ist.

B.2 Active Set-Methode für konvexe QPs

Wenn wir eine Lösung \mathbf{x}^* für das Problem (B.1) kennen, so ist auch die Menge der aktiven Nebenbedingungen $\mathcal{A}(\mathbf{x}^*)$ bekannt und wir können (B.1) vereinfachen zum Optimierungsproblem

$$\min_{\mathbf{x}} q(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} \mathbf{x}^T G \mathbf{x} + \mathbf{x}^T \mathbf{c}, \quad \text{s.t.} \quad \mathbf{a}_i^T \mathbf{x} = b_i, \quad i \in \mathcal{A}(\mathbf{x}^*). \tag{B.4}$$

Dieses könnten wir dann beispielsweise mit direkten Verfahren wie der Schur-Komplement-Methode oder der Nullraum-Methode lösen. Natürlich ist die optimale Lösung zu Beginn noch nicht bekannt und damit auch nicht die aktiven Restriktionen. Jedoch können wir diese Idee für die Active-Set-Methode verwenden.

Das Hauptziel der Active-Set-Methode ist, die Menge der aktiven Restriktionen bzgl. der optimalen Lösung zu finden, wobei wir hier die primale

Variante betrachten wollen, in der die Approximierte \mathbf{x}_k zulässig bzgl. des primalen Problems ist.

Die Grundidee ist, ein quadratisches Teilproblem zu lösen, bei dem wir bestimmte Nebenbedingungen aus Problem (B.1) bzgl. \mathcal{I} als aktiv annehmen. Die dadurch beschriebene Indexmenge der aktiven Restriktionen für \mathbf{x}_k im k -ten Schritt heißt *working set* und kann wie folgt beschrieben werden

$$\mathcal{W}_k = \{i \mid \mathbf{a}_i^T \mathbf{x}_k = b_i, i \in \mathcal{E} \cup \mathcal{J}, \mathcal{J} \subset \mathcal{I}\}.$$

Hierbei muss vorausgesetzt werden, dass die Nebenbedingungen in \mathcal{W}_k die LICQ-Bedingung erfüllen, selbst wenn diese bezogen auf alle Nebenbedingungen an der Stelle x_k nicht erfüllt wird.

Wir betrachten nun den k -ten Schritt mit der Approximierten \mathbf{x}_k und dem working set \mathcal{W}_k . Wir berechnen die neue Iterierte \mathbf{x}_{k+1} , indem wir eine Richtung \mathbf{p} finden, in der wir unter den Nebenbedingungen \mathcal{W}_k die Funktion q minimieren. Hierfür betrachten wir $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \mathbf{p}$ und setzen \mathbf{x}_{k+1} in q ein:

$$\begin{aligned} q(\mathbf{x}_{k+1}) &= q(\mathbf{x}_k + \mathbf{p}) = \frac{1}{2}(\mathbf{x}_k + \mathbf{p})^T G(\mathbf{x}_k + \mathbf{p}) + (\mathbf{x}_k + \mathbf{p})^T \mathbf{c} \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{x}_k^T G \mathbf{x}_k + \underbrace{\mathbf{x}_k^T G \mathbf{p}}_{\text{da } G \text{ symm.}} + \frac{1}{2} \mathbf{p}^T G \mathbf{p} + \mathbf{x}_k^T \mathbf{c} + \mathbf{p}^T \mathbf{c} \\ &= \frac{1}{2} \mathbf{p}^T G \mathbf{p} + \mathbf{g}_k^T \mathbf{p} + \rho_k, \end{aligned}$$

wobei $\mathbf{g}_k = G\mathbf{x}_k + \mathbf{c}$ und $\rho_k = \frac{1}{2} \mathbf{x}_k^T G \mathbf{x}_k + \mathbf{x}_k^T \mathbf{c}$. Da wir den Parameter \mathbf{p} so wählen wollen, dass $q(\mathbf{x}_{k+1})$ minimal wird, ist der Term ρ_k bzgl. des Problems konstant und kann somit für die Lösung jenes weggelassen werden. Da weiterhin auch \mathbf{x}_{k+1} die aktiven Nebenbedingungen \mathcal{W}_k erfüllen soll, gilt

$$\mathbf{a}_i^T \mathbf{p} = \mathbf{a}_i^T (\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k) = \underbrace{\mathbf{a}_i^T \mathbf{x}_{k+1}}_{=b_i} - \underbrace{\mathbf{a}_i^T \mathbf{x}_k}_{=b_i} = 0 \quad \forall i \in \mathcal{W}_k.$$

Zusammengefasst müssen wir also im k -ten Schritt das Teilproblem

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{p}} \quad & \frac{1}{2} \mathbf{p}^T G \mathbf{p} + \mathbf{g}_k^T \mathbf{p}, \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{a}_i^T \mathbf{p} = 0, \quad \forall i \in \mathcal{W}_k \end{aligned} \tag{B.5}$$

lösen. Die Lösung im k -ten Schritt von (B.5) bezeichnen wir mit \mathbf{p}_k . Umgekehrt gilt damit analog zur obigen Rechnung natürlich auch, dass für alle $i \in \mathcal{W}_k$ die Restriktion aktiv bleibt für $\mathbf{x}_k + \alpha \mathbf{p}_k$ mit beliebigem α . Da G positiv definit ist, kann (B.5) nun – wie schon bei (B.4) erwähnt – mit Schur-Komplement-Methode oder Nullraum-Methode gelöst werden.

Wie wir schon wissen, ist die neue Iterierte $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \mathbf{p}_k$ bzgl. \mathcal{W}_k immer noch zulässig. Nun müssen wir jedoch feststellen, ob diese Iterierte

auch alle übrigen Restriktionen mit $i \notin \mathcal{W}_k$ erfüllt. Ist dies der Fall, so setzen wir $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \mathbf{p}_k$, ansonsten suchen wir das größtmögliche $\alpha_k \in [0, 1]$, so dass

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \alpha_k \mathbf{p}_k$$

zulässig bleibt. Hierfür betrachten wir zwei Fälle.

Fall 1: Gilt für ein $i \notin \mathcal{W}_k$, dass $\mathbf{a}_i^T \mathbf{p}_k \geq 0$ ist, so folgt

$$\mathbf{a}_i^T (\mathbf{x}_k + \alpha_k \mathbf{p}_k) = \mathbf{a}_i^T \mathbf{x}_k + \underbrace{\alpha_k \mathbf{a}_i^T \mathbf{p}_k}_{\geq 0} \geq \mathbf{a}_i^T \mathbf{x}_k \geq b_i,$$

da $\alpha_k \geq 0$, d.h. für diese Nebenbedingungen müssen wir für die Wahl von α_k nichts beachten.

Fall 2: Existiert ein $i \notin \mathcal{W}_k$, für das $\mathbf{a}_i^T \mathbf{p}_k < 0$ ist, so gilt

$$\begin{aligned} & \mathbf{a}_i^T (\mathbf{x}_k + \alpha_k \mathbf{p}_k) \geq b_i \\ \iff & \mathbf{a}_i^T \mathbf{x}_k + \alpha_k \mathbf{a}_i^T \mathbf{p}_k \geq b_i \\ \iff & \alpha_k \underbrace{\mathbf{a}_i^T \mathbf{p}_k}_{< 0} \geq b_i - \mathbf{a}_i^T \mathbf{x}_k \\ \iff & \alpha_k \leq \frac{b_i - \mathbf{a}_i^T \mathbf{x}_k}{\mathbf{a}_i^T \mathbf{p}_k}. \end{aligned} \tag{B.6}$$

Damit folgt mit (B.6) und den vorherigen Überlegungen, dass zusammengefasst

$$\alpha_k = \min \left\{ 1, \min_{i \notin \mathcal{W}_k, \mathbf{a}_i^T \mathbf{p}_k < 0} \frac{b_i - \mathbf{a}_i^T \mathbf{x}_k}{\mathbf{a}_i^T \mathbf{p}_k} \right\} \tag{B.7}$$

gilt. Eine Restriktion $i \notin \mathcal{W}_k$, für die das Minimum für α_k angenommen wird, nennen wir *Blocking Constraint*; diese muss nicht eindeutig sein, da wir beispielsweise anschaulich auch von einer Ecke geblockt werden können. Ist $\alpha_k = 1$, werden alle Restriktion außerhalb vom working set mit dem Schritt $\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \mathbf{p}_k$ erfüllt, d.h. es gibt keine Blocking Constraint. Gibt es eine Nebenbedingung $j \notin \mathcal{W}_k$, die aktiv ist, obwohl sie nicht zum working set gehört, so gilt

$$\begin{aligned} \alpha_k &= \min \left\{ 1, \min_{i \notin \mathcal{W}_k, \mathbf{a}_i^T \mathbf{p}_k < 0} \frac{b_i - \mathbf{a}_i^T \mathbf{x}_k}{\mathbf{a}_i^T \mathbf{p}_k} \right\} \\ &= \min \left\{ 1, \frac{b_j - \mathbf{a}_j^T \mathbf{x}_k}{\mathbf{a}_j^T \mathbf{p}_k} \right\} \\ &= \min \left\{ 1, \frac{b_j - b_j}{\mathbf{a}_j^T \mathbf{p}_k} \right\} = 0. \end{aligned}$$

Es sei $j \notin \mathcal{W}_k$ nun ein Index einer Blocking Constraint. Dann ist

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{x}_k + \alpha_k \mathbf{p}_k = \mathbf{x}_k + \frac{b_j - \mathbf{a}_j^T \mathbf{x}_k}{\mathbf{a}_j^T \mathbf{p}_k} \mathbf{p}_k.$$

Setzen wir \mathbf{x}_{k+1} in die j -te Restriktion ein, so erhalten wir

$$\begin{aligned} \mathbf{a}_j^T \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{a}_j^T \left(\mathbf{x}_k + \frac{b_j - \mathbf{a}_j^T \mathbf{x}_k}{\mathbf{a}_j^T \mathbf{p}_k} \mathbf{p}_k \right) = \mathbf{a}_j^T \mathbf{x}_k + \frac{b_j - \mathbf{a}_j^T \mathbf{x}_k}{\cancel{\mathbf{a}_j^T \mathbf{p}_k}} \cdot \cancel{\mathbf{a}_j^T \mathbf{p}_k} \\ &= \mathbf{a}_j^T \mathbf{x}_k + b_j - \mathbf{a}_j^T \mathbf{x}_k = b_j, \end{aligned}$$

d.h. die Blocking Constraint ist für die neue Iterierte \mathbf{x}_{k+1} nach Konstruktion aktiv. Daher setzen wir als neues working set $\mathcal{W}_{k+1} = \mathcal{W}_k \cup \{j\}$.

Das oben beschriebene Vorgehen wiederholen wir so lange, bis wir das working set $\hat{\mathcal{W}}$ mit dem Minimum des quadratischen Problems $\hat{\mathbf{x}}$ gefunden haben. Dies ist leicht zu erkennen, da wir (B.1) auf \mathcal{W}_k nicht weiter minimieren können, sobald es keinen Schritt p gibt, in dessen Richtung wir q verringern können, d.h. wenn $\mathbf{p} = \mathbf{0}$ die Lösung für das Teilproblem (B.5) ist. Dann ist der optimale Punkt $\hat{\mathbf{x}}$ bzgl. des working sets $\hat{\mathcal{W}} \subset \mathcal{A}(\hat{\mathbf{x}})$ gefunden.

Wir müssen jetzt überprüfen, ob $\hat{\mathbf{x}}$ die KKT-Bedingungen erfüllt. Wir wissen, dass für $\mathbf{p} = \mathbf{0}$ die KKT-Bedingungen für (B.5)

$$\begin{pmatrix} G & A^T \\ A & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} -\mathbf{p} \\ \hat{\boldsymbol{\lambda}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \hat{\mathbf{g}} \\ \hat{\mathbf{h}} \end{pmatrix}$$

mit $\hat{\mathbf{g}} = \mathbf{c} + G\hat{\mathbf{x}}$, $\mathbf{h} = A\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{b}$ und $\mathbf{p} = \mathbf{0}$ erfüllt. Daraus folgt

$$\begin{aligned} A^T \hat{\boldsymbol{\lambda}} = \hat{\mathbf{g}} &\iff \sum_{i \in \hat{\mathcal{W}}} \mathbf{a}_i \hat{\lambda}_i = G\hat{\mathbf{x}} + \mathbf{c}, \\ \mathbf{0} = \hat{\mathbf{h}} &\iff A\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{b}, \end{aligned}$$

wobei A die Gradienten \mathbf{a}_i^T der aktiven Restriktionen $\hat{\mathcal{W}}$ zeilenweise enthält. Damit werden die ersten beiden KKT-Bedingungen aus (B.3) erfüllt. Da die Schrittänge α_k mit (B.6) so gewählt ist, dass die übrigen Restriktionen erfüllt bleiben, gilt auch die dritte Bedingung aus (B.3). Es bleibt zu überprüfen, ob die Lagrange-Multiplikatoren $\hat{\lambda}_i \geq 0$ sind.

Gilt $\hat{\lambda}_i \geq 0$ für alle $i \in \hat{\mathcal{W}} \cap \mathcal{I}$, so sind alle KKT-Bedingungen erfüllt und damit ist $\mathbf{x}^* = \hat{\mathbf{x}}$. Existiert allerdings ein $j \in \hat{\mathcal{W}} \cap \mathcal{I}$, so dass $\hat{\lambda}_j < 0$ ist, so können wir den Wert von q noch weiter verringern, indem wir die j -te Restriktion wegfällen lassen (vlg. [NW06], Kapitel 12.3). Dies zeigt das folgende Theorem.

Theorem B.2. *Der Punkt $\hat{\mathbf{x}}$ erfülle die notwendigen Bedingungen 1. Ordnung für das Teilproblem (B.5) auf $\hat{\mathcal{W}}$. Weiter seien die Gradienten $\mathbf{a}_i, i \in$*

$\hat{\mathcal{W}}$, linear unabhängig (LICQ) und es gebe einen Index $j \in \mathcal{W}$ mit $\hat{\lambda}_j < 0$. Es sei \mathbf{p} die Lösung vom Teilproblem (B.5) ohne die Restriktion j , d.h.

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{p}} \quad & \frac{1}{2} \mathbf{p}^T G \mathbf{p} + (G \hat{\mathbf{x}} + \mathbf{c})^T \mathbf{p}, \\ \text{s.t.} \quad & \mathbf{a}_i^T \mathbf{p} = 0, \quad \forall i \in \hat{\mathcal{W}} \setminus \{j\}. \end{aligned}$$

Dann ist \mathbf{p} eine zulässige Richtung für die Nebenbedingung j , d.h. $\mathbf{a}_j^T \mathbf{p} \geq 0$. Weiterhin gilt sogar $\mathbf{a}_j^T \mathbf{p} > 0$ und \mathbf{p} ist eine Abstiegsrichtung für q , wenn \mathbf{p} die hinreichenden Bedingungen 2. Ordnung erfüllt.

Da wir zeigen können, dass der erzielte Abstieg für q durch das Weglassen einer Nebenbedingung mit negativem Lagrange-Multiplikator λ_i proportional zu $|\lambda_i|$ ist, eliminieren wir gerade die Restriktion mit kleinstem Langrange-Multiplikator. Es kann allerdings sein, dass der folgende zu berechnende Schritt \mathbf{p} aufgrund einer Blocking Constraint kurz ist, wodurch nicht garantiert ist, dass q den größtmöglichen Abstieg erfährt.

B.3 Algorithmus

Algorithm B.1 Active-Set-Methode für konvexe quadratische Probleme

Gegeben sei ein zulässiger Startpunkt \mathbf{x}_0 für (B.1) und definiere \mathcal{W}_0 z.B. mit allen aktiven Restriktionen bzgl. \mathbf{x}_0 .

```

for k = 0,1,2,... do
    Löse (B.5) zur Berechnung von  $\mathbf{p}_k$ ;
    if  $\mathbf{p}_k = \mathbf{0}$  then
        Berechne die Lagrange-Multiplikatoren mittels (2.5a)
        und setze  $\hat{\mathcal{W}} = \mathcal{W}_k$ ;
        if  $\hat{\lambda}_i \geq 0 \forall i \in \hat{\mathcal{W}} \cap \mathcal{I}$  then
            stop mit der Lösung  $\mathbf{x}^* = \hat{\mathbf{x}}$ ;
        else
             $j \leftarrow \arg \min_{j \in \mathcal{W}_k \cap \mathcal{I}} \hat{\lambda}_j$ ;
             $\mathbf{x}_{k+1} \leftarrow \mathbf{x}_k, \mathcal{W}_{k+1} \leftarrow \mathcal{W}_k \setminus \{j\}$ ;
        end if
    else ( $\mathbf{p}_k \neq \mathbf{0}$ )
        Berechne  $\alpha_k$  mit (B.7);
         $\mathbf{x}_{k+1} \leftarrow \mathbf{x}_k + \alpha_k \mathbf{p}_k$ ;
        if  $\alpha_k < 1$  (Blocking Constraint existiert) then
            Bestimme Blocking Constraint  $j$  und setze  $\mathcal{W}_{k+1} \leftarrow \mathcal{W}_k \cup \{j\}$ 
        else
             $\mathcal{W}_{k+1} \leftarrow \mathcal{W}_k$ 
        end if
    end if
end for

```

Anhang C

Tensorrechnung

C.1 Tensoralgebra

Definition C.1. Es sei V ein endlicher Vektorraum und \mathbb{K} ein beliebiger Körper. Ein p -Tensor (oder auch p -stufiger Tensor) $\varphi : V \times \dots \times V \rightarrow \mathbb{K}$ ist eine multilinear Abbildung, d.h. linear in jeder Komponente. Die Menge aller p -Tensoren über V wird mit $T^p(V)$ bezeichnet.

Beispiel C.2. Der Dualraum V^* eines Vektorraums V ist der Raum der Linearformen, also der Raum der 1-Tensoren. Also können wir schreiben $V^* = T^1(V)$.

Bemerkung C.3. Da V endlich ist, können wir $T^p(V)$ durch eine endliche Anzahl von Basisvektoren $\varphi_k \in T^p(V)$ aufspannen. Solche Basisvektoren lassen sich durch die Basis des Dualraumes V^* und der folgenden Definition bilden.

Definition C.4 (Tensorprodukt). Ist $\varphi \in T^p(V)$ und $\psi \in T^q(V)$, so definieren wir das *Tensorprodukt* (oder auch *dyadische Produkt*) $\varphi \otimes \psi \in T^{p+q}(V)$ durch

$$(\varphi \otimes \psi)(v_1, \dots, v_p, v_{p+1}, \dots, v_{p+q}) = \varphi(v_1, \dots, v_p) \cdot \psi(v_{p+1}, \dots, v_{p+q}).$$

Bemerkung. Wir sollten beachten, dass $\varphi \otimes \psi$ nicht zwangsläufig kommutativ ist.

Bemerkung C.5. Da $T^1(V)$ der Raum der Linear- und $T^2(V)$ der Raum der Bilinearformen ist, können wir die Elemente als Vektoren bzw. Matrizen identifizieren. Hierbei ist allerdings zu beachten, dass diese nur die Koordinaten bzgl. der jeweils betrachteten Basen angeben.

Wir notieren einstufige Tensoren, d.h. Elemente aus $T^1(V)$, in fetten Kleinbuchstaben, also $\mathbf{a}, \mathbf{b}, \mathbf{c}$ usw., und schreiben diese bzgl. der Standardbasis

$$\mathbf{a} = a_i \mathbf{e}_i := \sum_{i=1}^n a_i \mathbf{e}_i.$$

Hierbei ist die *Einstein'sche Summenkonvention* benutzt worden, in der über doppelt vorkommende Indizes summiert wird.

Analog beschreiben wir zweistufige Tensoren, also Elemente aus $T^2(V)$, mit fetten Großbuchstaben, d.h. $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}$ etc., und schreiben diese bzgl. der Standardbasis als Tensorprodukt von zwei einstufigen Tensoren:

$$\mathbf{A} = A_{ij} \mathbf{e}_i \otimes \mathbf{e}_j := \sum_{i,j=1}^n A_{ij} \mathbf{e}_i \otimes \mathbf{e}_j .$$

Bemerkung. Die Tensordarstellung aus Bemerkung C.5 kann natürlich auch bzgl. allgemeiner Basen geschehen.

Definition C.6 (Kroneckerdelta, Einheitstensor). Das *Kroneckerdelta* ist definiert durch

$$\delta_{ij} := \begin{cases} 1, & i = j \\ 0, & \text{sonst} \end{cases} .$$

Damit können wir den zweistufigen *Einheitstensor* definieren durch

$$\mathbf{1} := \delta_{ij} \mathbf{e}_i \otimes \mathbf{e}_j .$$

Bemerkung C.7. Wir können leicht nachrechnen, dass das Kroneckerdelta folgende Eigenschaften hat:

$$\delta_{ij} \delta_{jk} = \delta_{ik}, \quad \delta_{ij} \delta_{jk} \delta_{kl} = \delta_{il} .$$

Mit diesen Eigenschaften können wir beispielsweise 4- oder 6-stufige Einheitstensoren definieren.

Definition C.8 (Skalarprodukte). Das *einfach verjüngende Skalarprodukt* ist für zwei Vektoren (1-Tensoren) \mathbf{a}, \mathbf{b} definiert als

$$\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} := (a_i \mathbf{e}_i) \cdot (b_j \mathbf{e}_j) = a_i b_j \underbrace{\mathbf{e}_i \cdot \mathbf{e}_j}_{=\delta_{ij}} = a_i b_i .$$

Das *doppelt verjüngende Skalarprodukt* ist für zwei Matrizen (2-Tensoren) \mathbf{T}, \mathbf{S} definiert als

$$\mathbf{T} : \mathbf{S} = (T_{ij} \mathbf{e}_i \otimes \mathbf{e}_j) : (S_{kl} \mathbf{e}_k \otimes \mathbf{e}_l) := T_{ij} S_{kl} \delta_{ik} \cdot \delta_{jl} = T_{ij} S_{ij} .$$

Bemerkung C.9. Analog können wir die Skalarprodukte aus Definition C.8 auch auf höher stufige Tensoren übertragen. Die Skalarprodukte heißen einfach und doppelt verjüngend, da sie im Endergebnis die Stufe der Tensoren um eins bzw. zwei verringern.

C.2 Tensoranalysis

In dieser Arbeit werden skalar-, vektor- oder auch tensorwertige Funktionen in einem mehrdimensionalen Raum verwendet. Hierfür wollen wir Gradient und Divergenz einführen.

Definition C.10 (Gradient,Divergenz). Der *Gradient* einer skalar-, vektor- oder tensorwertige Funktionen ist definiert als

$$\text{grad}(\dots) := \frac{\partial(\dots)}{\partial \mathbf{x}} := \frac{\partial(\dots)}{\partial x_i} \otimes \mathbf{e}_i := (\dots)_{,i} \otimes \mathbf{e}_i .$$

Für den Gradienten schreiben wir auch häufig den Nabla-Operator ∇ .

Die *Divergenz* einer skalar-, vektor- oder tensorwertige Funktionen ist definiert durch

$$\text{div}(\dots) := \nabla \cdot (\dots) = \frac{\partial(\dots)}{\partial x_i} \cdot \mathbf{e}_i = (\dots)_{,i} \cdot \mathbf{e}_i .$$

Bemerkung. Der Gradient vergrößert also die Stufe eines Tensors, während die Divergenz diese verringert.

Für den Gradienten und die Divergenz gelten eine Reihe von Produktregeln bzgl. tensorwertigen Funktionen (von 0. bis 2. Stufe). Folgende werden wir davon benötigen.

Satz C.11 (Produktregeln). *Es seien $\phi(\mathbf{x})$ ein skalarwertiges, $\mathbf{a}(\mathbf{x})$ ein vektorwertiges und $\mathbf{T}(\mathbf{x})$ ein tensorwertiges (2. Stufe) Tensorfeld. Dann gelten für die Divergenz folgende Produktregeln.*

$$\text{div}(\phi \cdot \mathbf{a}) = \text{grad } \phi \cdot \mathbf{a} + \phi \cdot \text{div } \mathbf{a} \quad (\text{C.1})$$

$$\text{div}(\mathbf{a} \cdot \mathbf{T}) = \text{grad } \mathbf{a} : \mathbf{T} + \mathbf{a} \cdot \text{div } \mathbf{T} \quad (\text{C.2})$$

Beweis. Einfaches Nachrechnen. □

Weiter gelten in der Tensoranalysis verschiedene Integralsätze von Gauß, Stokes und Green, von denen wir folgende aufführen wollen, wobei wir uns wieder auf $\Omega \subset \mathbb{R}^2, \partial\Omega = \Gamma$ beschränken.

Satz C.12 (Integralsatz von Gauß). *Es seien die Tensorfelder $\mathbf{a}(\mathbf{x}), \mathbf{T}(\mathbf{x})$ wie in Satz C.11 gegeben. Dann gelten die Sätze von Gauß*

$$\int_{\Omega} \text{div } \mathbf{a} d\Omega = \int_{\Gamma} \mathbf{a} \cdot \mathbf{n} d\Gamma , \quad (\text{C.3a})$$

$$\int_{\Omega} \text{div } \mathbf{T} d\Omega = \int_{\Gamma} \mathbf{T} \cdot \mathbf{n} d\Gamma , \quad (\text{C.3b})$$

wobei \mathbf{n} die äußere Einheitsnormale auf Γ bezeichne.

Beweis. Standardresultat aus der Analysis 2. \square

Korollar C.13 (1. Green'sche Formel). *Es seien $u, v : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ skalarwertige Funktionen. Dann folgt*

$$\int_{\Omega} v \Delta u \, dx + \int_{\Omega} \nabla u \cdot \nabla v \, dx = \int_{\Gamma} v \partial_{\mathbf{n}} u \, ds \quad (\text{C.4})$$

mit $\partial_{\mathbf{n}} u = \nabla u \cdot \mathbf{n}$.

Beweis. Es seien u, v wie vorausgesetzt. Dann ist ∇u vektorwertig und nach (C.1) gilt dann

$$\begin{aligned} \operatorname{div}(v \cdot \nabla u) &= \nabla v \cdot \nabla u + v \cdot \operatorname{div}(\nabla u) \\ &= \nabla v \cdot \nabla u + v \cdot \Delta u. \end{aligned}$$

Weiter gilt wegen (C.3a)

$$\int_{\Omega} \operatorname{div}(v \cdot \nabla u) \, d\Omega = \int_{\Gamma} v \cdot \underbrace{\nabla u \cdot \mathbf{n}}_{=\partial_{\mathbf{n}} u} \, d\Gamma.$$

Zusammen mit dem oberen Resultat folgt dann die Behauptung (C.4). \square

Anhang D

Quellcode

D.1 Implementierung des Fehlerschätzers für das Hindernisproblem

Im Folgenden ist der Quellcode angegeben, der für die Implementierung für das in Kapitel 4 beschriebene affine Hindernisproblem geschrieben wurde. Als letztes sind auch die Startdateien für die in Kapitel 6.1 dargestellten numerischen Beispiele angegeben.

```
1 function [A, f] = assemble(points, triangle, fun, num_of_nodes, option, u_S)
2 %ASSEMBLE evaluates the global matrix A and load vector f out of the
3 % given nodes, triangles, loadfunction, number of nodes and the
4 % Galerkin approximation u_S.
5
6 % ordering: triangles ↔ midpoints:
7 [midpoints, midtriangle] = midpoints_of_triangle(triangle, points);
8
9 % initialising the dimension and the solution:
10 np = size(points, 2);
11 nt = size(triangle, 2);
12 nmp = size(midpoints, 2);
13
14 if nargin == 4
15     option = 'linear';
16     u_S = zeros(np, 1);
17 end
18
19 if nargin == 5
20     u_S = zeros(np, 1);
21 end
22
23 % beginning of the assembling:
24 switch lower(option)
25     case {'linear'}
26         % linear hatfunctionen on the reference-element:
27         hat = @(xi, eta) [1 - xi - eta; xi; eta];
28
29         % initialising of the global values:
30         A = sparse(np, np);
31         f = sparse(np, 1);
32         my_tri = triangle(1:3, :);
```

D. Quellcode

```

31
32 case {'bubble','quadratic'}
33 % bubblefunctionen on the reference-element:
34 hat = @(xi,eta) [4*xi.*(1-xi-eta); 4*xi.*eta; 4*eta.*(1-xi-eta)];
35
36 % initialising of the global values:
37 A = sparse(nmp,nmp);
38 f = sparse(nmp,1);
39 my_tri = midtriangle;
40 end
41
42 % loop over the triangles for the assembling:
43 for i = 1:nt
44 poi = points(:,triangle(1:3,i));
45 u_S_loc = u_S(triangle(1:3,i));
46 tri = my_tri(:,i);
47
48 % evaluation of the local linear stiffness matrix and the
49 % Jacobian:
50 [S,f1,J] = local_mat(poi,u_S_loc,option);
51
52 % Evaluating the local vector f1: (here is Gauss-quadrature over
53 % triangles used)
54 [wi,gauss,ansatz_values] = quad_tri(poi,hat,num_of_nodes);
55
56 % quadrature over a triangle:
57 for k = 1:3
58     f1(k) = f1(k)+J*sum(wi.*fun(gauss(1,:),gauss(2,:)).*...
59     ansatz_values(k,:));
60 end
61
62 % assembling into the global stiffness matrix A and the load
63 % vector f:
64 for k = 1:3
65     for l = 1:3
66         A(tri(k),tri(l)) = A(tri(k),tri(l))+S(k,l);
67     end
68
69     f(tri(k)) = f(tri(k))+f1(k);
70 end

```

Code D.1: Assemblierung der Steifigkeitsmatrix A und des Lastvektor f

```

1 function rho_p =
2     eval_rho_p(nodes,triangles,midpoints,midtri,u_S,eps_V,fun)
3 %EVAL_RHO_P evaluates the local contribution rho_P of rho_S, given
4 % the nodes, triangles, midpoints of the edges (of the triangles)
5 % and die midpoints-triangle-ordering (midtri). Also it is given
6 % the solution auf die local defect problem eps_V and the function
7 % fun, which is part of the integral in rho_S. u_S are, as always,
8 % the Galerkin solution.
9
10 % Initializing:
11 np = size(nodes,2);
12 rho_p = zeros(np,1);
13
14 % Hat- and Bubble-functions:
15 phi_P = @(xi,eta) [1-xi-eta; xi; eta];
16 phi_E = @(xi,eta) [4*xi.*(1-xi-eta); 4*xi.*eta; 4*eta.*(1-xi-eta)];

```

D. Quellcode

```

11 % Evaluation of the weights and values of the function for the
12 % surface integral:
13 [wi,~,phi_E_values] = quad_tri([0,1,0;0,0,1],phi_E,7);
14 [~,~,phi_P_values] = quad_tri([0,1,0;0,0,1],phi_P,7);
15
16 for k = 1:np
17     % Ordering triangle ↔ reference function and support of phi_P:
18     [phi_p_local,w_p] = find(triangles(1:3,:)==k);
19     % indices of the edges in the considered triangle:
20     E_index = midtri(:,w_p);
21
22     % Evaluation of the surface integral of rho_p over w_p:
23     for j = 1:length(w_p)
24         % points of the considered triangle with Jacobi determinant:
25         mypoi = nodes(:,triangles(1:3,w_p(j)));
26         x = mypoi(1,:);
27         y = mypoi(2,:);
28         J = (x(2)-x(1))*(y(3)-y(1))-(x(3)-x(1))*(y(2)-y(1));
29         % Gauss-points and local contributions of eps_V:
30         eps_V_local = eps_V(E_index(:,j));
31         [~,gauss,~] = quad_tri(mypoi,@(x,y) 0,7);
32         % the functionvalues of the considered local hatfunction
33         phi_P:
34         phi_Pl_values = phi_P_values(phi_p_local(j),:);
35         % evaluation of the first integral of rho_p:
36         rho_p(k) = rho_p(k) + J *
37             sum(wi.*fun(gauss(1,:),gauss(2,:)).*...
38                 (eps_V_local'*phi_E_values).*(phi_Pl_values));
39     end
40
41     % Evaluation of the line integral over the edges E\in E_p:
42     % Evaluaton of the set E_p of the edges, which contain the
43     % point P:
44     [~,E_p] = find(midpoints(3:4,:)==k);
45     % Evaluation of the normal-fluxes j_E for all edges in E_p:
46     j_E = normal_flux(E_p,nodes,triangles,midpoints,u_S);
47
48     for i = 1:length(E_p)
49         % evaluating the points of the edges:
50         edge_poi_ind = midpoints(3:4,E_p(i));
51         edge_poi = nodes(:,edge_poi_ind);
52
53         % affin transformation of the local integral on the
54         % global edge by multiplication of the jacobian:
55         laenge = norm(edge_poi(:,1)-edge_poi(:,2));
56         global_phiPE_int = 1/3*laenge;
57
58         % determination of the functionvalues of eps_V(x_E):
59         epsV_loc = eps_V(E_p(i));
60
61         % adding the line integral to the local contribution
62         rho_p:
63         rho_p(k) = rho_p(k)+j_E(i)*epsV_loc*global_phiPE_int;
64     end
65 end
66 end

```

Code D.2: Berechnung der lokalen Anteile von ρ_S

D. Quellcode

```

1 function [eps_V_exact ,rho_E ,d_E ,a_phi] =
2   defect_problem_solution(points ,triangle ,mid_triangle ,rho_s ,u_S_mid ,
3   z_obs_midpoints)
4 %DEFECT_PROBLEM SOLUTION evaluates the solution of the local defect
5 % problem (2.9) , given the nodes , triangles ,
6 % triangle - midpoints - ordering , the functionvalues of the Galerkin
7 % solution u_S at the midpoints and the same for the solution .
8
9 % initializing :
10 ntri = size(triangle ,2);
11 nmp = size(u_S_mid ,1);
12
13 dxi_bubble = @(xi ,eta) [4-8*xi-4*eta ; 4*eta ; -4*eta ];
14 deta_bubble = @(xi ,eta) [-4*xi ; 4*xi ; 4-4*xi-8*eta ];
15 mymidtri = [ mid_triangle ; zeros(1,ntri) ];
16 a_phi = zeros(nmp,1);
17
18 % evaluation of the value a(phi_E ,phi_E) to determine the norm of
19 % phi_E :
20 for i = 1 : nmp
21   index = find(mymidtri == i );
22   bubble_ind = mod(index ,4);
23   triangle_ind = ceil(index/4);
24
25   poi = points (:,triangle(1:3 ,triangle_ind));
26   x = poi(1 ,:);
27   y = poi(2 ,:);
28   J = (x(2)-x(1))*(y(3)-y(1)) - (x(3)-x(1))*(y(2)-y(1));
29   a = ((x(3)-x(1))^2 + (y(3)-y(1))^2);
30   b = -( (y(2)-y(1))*(y(3)-y(1)) + (x(2)-x(1))*(x(3)-x(1)) );
31   c = ((x(2)-x(1))^2 + (y(2)-y(1))^2);
32
33   [wi ,~,val_dxi_bubble] = quad_tri(poi ,dxi_bubble ,7);
34   [~,~,val_deta_bubble] = quad_tri(poi ,deta_bubble ,7);
35
36   for j = 1 : length(bubble_ind)
37     a_phi(i) = a_phi(i) + 1/J* sum(wi.* (a*val_dxi_bubble ...
38       (bubble_ind(j),:).^2 +
39       b*val_dxi_bubble(bubble_ind(j),:).* ...
40       val_deta_bubble(bubble_ind(j),:)* 2 ...
41       +c*val_deta_bubble(bubble_ind(j),:).^2));
42   end
43
44 end
45
46 % evaluating the values of (2.11) and at least (2.10) :
47 a_phi = a_phi.^ (1/2);
48 rho_E = rho_s ./ a_phi;
49 d_E = (u_S_mid - z_obs_midpoints).* a_phi;
50 eps_V_exact = max(-d_E ,rho_E) ./ a_phi;
51
52 end

```

Code D.3: Lösung des lokalen Defektproblems (4.9)

D. Quellcode

```

1 function triangle_index =
2     find_triangle_refinement(rho_p, rho_global, osc_local, osc_global,
3         triangles, theta_rho, theta_osc, option)
4 %FIND_TRIANGLE_REFINEMENT evaluates the possible indices of
5 % triangles, which will be refined, given the local contribution
6 % rho_p of the error indicator rho_global, the local contributions
7 % osc_local of the oscillation terms osc_global, the triangles and
8 % two parameter to provide a boundary.
9
10
11 if nargin == 7
12     option = ',';
13 end
14
15 switch lower(option)
16 case 'symmetric'
17     % evaluating the points, which have got a large contribution
18     % to the error indicator:
19     while 1
20         new_rho = max(rho_p);
21         new_points = find(abs(rho_p - new_rho) < 0.001);
22         rho_p(new_points) = 0;
23         number_new_points = length(new_points);
24         bound(counter) = number_new_points * new_rho;
25         point_index(counter:counter+number_new_points-1) =
26             new_points;
27         counter = counter + number_new_points;
28
29         % termination criterion for the search of the points:
30         if sum(bound) >= theta_rho*rho_global
31             break;
32         end
33
34     % evaluation of the points, which oscillation contribution is
35     % high:
36     while 1
37         % termination criterion for the search of the points:
38         if sum(bound) >= theta_osc*osc_global
39             break;
40         end
41
42         new_osc = max(osc_local);
43         new_point = find(abs(osc_local - new_osc) < 0.001);
44         osc_local(new_point) = 0;
45         number_new_points = length(new_point);
46         bound(counter) = number_new_points * new_osc;
47         point_index(counter:counter+number_new_points-1) =
48             new_point;
49         counter = counter + number_new_points;
50
51     otherwise
52         % evaluating the points, which have got a large contribution
53         % to the error indicator:

```

D. Quellcode

```

51     while 1
52         [new_rho ,index] = max(rho_p);
53         rho_p(index) = 0;
54         bound(counter) = new_rho;
55         point_index(counter) = index;
56         counter = counter + 1;
57
58         % termination criterion for the search of the points:
59         if sum(bound) >= theta_rho*rho_global
60             break;
61         end
62     end
63
64     % evaluation of the points , which oscillation contribution is
65     % high:
66     while 1
67         % termination criterion for the search of the points:
68         if sum(bound) >= theta_osc*osc_global
69             break;
70         end
71         [new_osc ,index] = max( osc_local );
72         osc_local(index) = 0;
73         bound(counter) = new_osc;
74         point_index(counter) = index;
75         counter = counter + 1;
76     end
77 end
78
79 % determination of the triangles indices for the refinement:
80 point_index = setdiff(point_index,0);
81
82 for k = 1:length(point_index)
83     help_index = neighbourhood(point_index(k),triangles,'point');
84     triangle_index = union(triangle_index,help_index);
85 end
86
87 end

```

Code D.4: Berechnung der zu verfeinernden Dreiecksindizes

```

1 function grad_u = gradu(points ,zvalues)
2 %GRADU determines for given (x,y,z)-values the gradient of the
3 % function u=a*x+b*y+c*z, that is grad u=(a,b).
4
5 % x- and y-values of the points:
6 x = points(1,:);
7 y = points(2,:);
8
9 % the Jacobian:
10 J = (x(2)-x(1))*(y(3)-y(1)) - (x(3)-x(1))*(y(2)-y(1));
11
12 % evaluating grad_u:
13 grad_u = 1/J * ([y(3)-y(1) , y(1)-y(2); x(1)-x(3) , x(2)-x(1)]*...
14 [zvalues(2)-zvalues(1);zvalues(3)-zvalues(1)]);
15

```

Code D.5: Berechnung des Gradienten von der Galerkin-Approximation auf einem Dreieck

D. Quellcode

```

1 function non_bound_index = inner_points(adjacency)
2 %DIRICHLET.BOUNDARY assembles the inner points, that is the non
3 % boundary points, by using the adjacency matrix given by assemb.
4 % evaluating the inner points out of the adjacency matrix:
5 [m,n] = size(adjacency);
6 non_bound_index = find(prod(adjacency == zeros(m,n)));
7
8 end

```

Code D.6: Bestimmung der inneren Knoten $\mathcal{N} \cap \Omega$

```

1 function N0_set = N0(uS_values, inner_points, obstacle_values)
2 %N0 determines the set  $N^0$  of the inner points, which are in contact
3 %with the obstacle. It will be done by simply compare the function
4 %values of u_S and the obstacle.
5 index = find(abs(uS_values - obstacle_values) < 0.00001);
6 N0_set = intersect(index, inner_points);
7
8 end

```

Code D.7: Bestimmung der inneren Kontaktknoten \mathcal{N}^0

```

1 function Nplus_set = Nplus(contact_set, inner_points, nodes)
2 %NPLUS computes the set  $N^+$  of the inner non-contact nodes, given the
3 %set of contact nodes  $N^0$ , inner points and the set of all nodes.
4 np = length(nodes);
5 index = setdiff(1:np, contact_set);
6 Nplus_set = intersect(index, inner_points);
7
8 end

```

Code D.8: Bestimmung der inneren Nicht-Kontaktknoten \mathcal{N}^+

```

1 function Nplusplus_set = Nplusplus(Nplus_set, edges, rho_E, d_E)
2 %NPLUSPLUS calculates the set  $N^{++}$  of non-contact nodes, where the
3 %approximate error eps_V is not in contact.
4
5 % Initialization:
6 Nplusplus_set = zeros(size(Nplus_set));
7
8 % evaluation of the entries of  $N^{++}$ :
9 for i = 1:length(Nplus_set)
10     [~, E_p] = find(edges == Nplus_set(i));
11
12     % verify if for all  $E \in E_p$  is valid:  $\rho_E \geq -d_E$ 
13     if all(rho_E(E_p) + d_E(E_p) >= 0)
14         Nplusplus_set(i) = Nplus_set(i);
15     end
16 end
17
18 % elimination of the zeros:
19 Nplusplus_set = setdiff(Nplusplus_set, 0);
20
21 end

```

Code D.9: Bestimmung der Menge \mathcal{N}^{++}

D. Quellcode

```

1 function [N0plus_set , N0minus_set] = N0plusminus(N0_set , nodes ,
2 triangles , edges , edge_triangles , f_load , obstacle , uS_values)
3 %N0PLUSMINUS evaluates the sets  $N^{\{0+\}}$  and  $N^{\{0-\}}$  for the calculation
4 % of the oscillationterms , given the inner contact nodes N^0_set ,
5 % the nodes of the mesh, the triangle ordering , the edges and the
6 % midpoints-triangle ordering , the loadfunction , the obstacle and
7 % vector of u_S values .
8
9 % parameter for the approximate of zero:
10 zero = 0.0001;
11
12 % initializing of the sets  $N^{\{0+\}}$  and  $N^{\{0-\}}$ :
13 N0plus_set = zeros(size(N0_set));
14 N0minus_set = zeros(size(N0_set));
15
16 % calculating the points of the reference element to compare the
17 % functionvalues later:
18 [xi , eta] = meshgrid(0:0.01:1 , 0:0.01:1);
19 index_out_of_bounds = find(xi+eta>1);
20 xi(index_out_of_bounds) = 0;
21 eta(index_out_of_bounds) = 0;
22 [m_mesh , n_mesh] = size(xi);
23 np = m_mesh * n_mesh;
24 index_within = setdiff(1:np , index_out_of_bounds);
25
26 % hat functions with functionvalues:
27 phi_P = @(xi , eta) [1-xi-eta ; xi ; eta];
28 phi_P_values = phi_P(xi , eta);
29
30 % evaluation of the indices of the  $N^{\{0+\}}$  nodes:
31 for i = 1:length(N0_set)
32     % support of the shape function and index of the local shape
33     % function:
34     [phi_p_local , w_p] = find(triangles(1:3,:) == N0_set(i));
35     flag_plus = 0;           % verification value for the condition of N0+
36     flag_minus = 0;          % verification value for the condition of N0-
37
38     for j = 1:length(w_p)
39         % vertices of the triangle and functionvalues of u_S:
40         p_index = triangles(1:3 , w_p(j));
41         uS_local = uS_values(p_index);
42         mypoi = nodes(:, p_index);
43         x = mypoi(1,:);
44         y = mypoi(2,:);
45
46         % transformation from the local onto the global triangle:
47         xval = x(1)+(x(2)-x(1)).*xi+(x(3)-x(1)).*eta;
48         yval = y(1)+(y(2)-y(1)).*xi+(y(3)-y(1)).*eta;
49
50         % evaluating the functionvalues of u_S-psi:
51         z = uS_local(1)*phi_P_values(1:m_mesh,:)+uS_local(2)*...
52             phi_P_values(1+m_mesh:2*m_mesh,:)+uS_local(3)*...
53             phi_P_values(1+2*m_mesh:3*m_mesh,:)-obstacle(xval , yval);
54
55         % computing the functionvalues of the load f_load:
56         f = f_load(xval , yval);
57
58         % verificating , if u_S-psi>0 and if u_S=psi & f<=0:
59         switch phi_p_local(j)
60             case 1
61                 new_within = setdiff(index_within , 1);

```

D. Quellcode

```

55      case 2
56          new_within = setdiff(index_within, sub2ind([m_mesh, ...
57              n_mesh], 1, n_mesh));
58      case 3
59          new_within = setdiff(index_within, m_mesh);
60      end
61
62      % If any z-value is less than zero, the point cannot be an
63      % element of  $N^{\{0+\}}$ , that is, why flag_plus = 1. If all
64      % f_load-values and all z-values are less than zero, p
65      % could be in  $N^{\{0-\}}$ :
66      if any(z(new_within) <= zero)
67          flag_plus = 1;
68
69      z_nodes = uS_local-obstacle(x,y)';
70      if (all(abs(z_nodes) <= zero) && all(f(index_within)<=0))
71          flag_minus = flag_minus + 1;
72      end
73  end
74
75  % verification if there is no contact except of the point p:
76  if flag_plus == 0
77      N0plus_set(i) = N0_set(i);
78      continue;
79  end
80
81  % verification of  $j_E \leq 0$  for all  $E$  in  $E_p$ : evaluating of the
82  % set of edges  $E_p$ , which contains the point p:
83  [~, E_p] = find(edges(3:4,:)==N0_set(i));
84  % evaluating the normal fluxes of all edges of  $E_p$ :
85  j_E =
86      normal_flux(E_p, nodes, triangles, edges, edge_triangles, uS_values)
87  % verificating, if there is full contact and  $f \leq 0$  and  $j_E \leq 0$  for
88  % all  $E$  in  $E_p$ :
89  if (flag_minus == length(w_p) && all(j_E <= zero))
90      N0minus_set(i) = N0_set(i);
91  end
92
93 end
94
95 % elimination of the zeros:
96 N0plus_set = setdiff(N0plus_set, 0);
97 N0minus_set = setdiff(N0minus_set, 0);
98
99 end

```

Code D.10: Berechnung der Menge an Knoten aus N^{0+} und N^{0-}

```

1 function [S, f_local, J] = local_mat(points, uS_local, option)
2 %LOCALMAT computes the Jacobian J, a local stiffness matrix S and if
3 %option='bubble' a local vector f_local, which will be needed for
4 %a(uS,*) in rho_S. LOCALMAT expects the nodes (points) of the
5 %local triangle, the z-values uS_local of this nodes and an
6 %option, which can be 'linear' or 'bubble'.
7
8 % initialization of f_local:
9 f_local = zeros(3,1);
10
11 % x- and y-values of the nodes:
12 x = points(1,:);
13 y = points(2,:);

```

D. Quellcode

```

11 % the Jacobian J and other factors for the affine transformation from
12 % the reference element onto a arbitrary triangle:
13 J = (x(2)-x(1))*(y(3)-y(1)) - (x(3)-x(1))*(y(2)-y(1));
14 a = 1/J * ((x(3)-x(1))^2 + (y(3)-y(1))^2);
15 b = -1/J * ((y(2)-y(1))*(y(3)-y(1)) + (x(2)-x(1))*(x(3)-x(1)));
16 c = 1/J * ((x(2)-x(1))^2 + (y(2)-y(1))^2);
17
18 switch lower(option)
19   case {'linear'}
20     % local stiffness matrix for linear shape functions:
21     S = [ a/2+b+c/2, -a/2-b/2, -b/2-c/2;
22           -a/2-b/2, a/2, b/2;
23           -b/2-c/2, b/2, c/2 ];
24   case {'bubble'}
25     % local stiffness matrix for quadratic shape functions:
26     S_quad = 4/3* [ a+b+c, -b-c, b;
27                      -b-c, a+b+c, -a-b;
28                      b, -a-b, a+b+c ];
29     S = diag(diag(S_quad));
30
31   % gradient of u_S:
32   gradu_S = gradu(points, u_S_local);
33   % transformation onto the reference element:
34   gradu_S = [x(2)-x(1), y(2)-y(1); x(3)-x(1), y(3)-y(1)]*gradu_S';
35   % f_local:
36   f_local = -(a*gradu_S(1)+b*gradu_S(2))*[0; 2/3; -2/3]...
37   - (b*gradu_S(1)+c*gradu_S(2))*[-2/3; 2/3; 0];
38   case {'quadratic'}
39     % local stiffness matrix for quadratic shape functions:
40     S = 4/3* [ a+b+c, -b-c, b;
41                 -b-c, a+b+c, -a-b;
42                 b, -a-b, a+b+c ];
43   otherwise
44     error('Unknown option');
45 end
46

```

Code D.11: Bestimmung der lokalen Steifigkeitsmatrix im linearen und quadratischen Fall

```

1 function [neighbours, flag] =
2   neighbourhood(edges_or_point, triangles, option)
3 %EDGE_NEIGHBOURHOOD computes the indices of the triangles, which are
4 %the neighbours for the given edges or point. The vector flag
5 %shows, if an edge has got only one neighbour (flag = 0) or two
6 %(flag = 1).
7 n = length(edges_or_point);
8 flag = zeros(1, n);
9
10 switch lower(option)
11   case {'edge', 'edges'}
12     neighbours = zeros(2, n);
13
14   for i = 1:n
15     [~, neighbours(:, i)] = find(triangles==edges_or_point(i));
16
17   if neighbours(1, i) ~= neighbours(2, i)
18     flag(i) = 1;
19   end

```

D. Quellcode

```

17     end
18
19 case {'point'}
20 [~,neighbours] = find(triangles(1:3,:)==edges_or_point);
21 end

```

Code D.12: Berechnung der Indizes anliegender Dreiecke

```

1 function [midpoints,mid_triangle] =
2     midpoints_of_triangle(triangle,points)
%MIDPOINTS_OF_TRIANGLE evaluates the midpoints of the edges of the
3     triangle T. The first and second row stores the x- and y-values
4     of the midpoints and the third and fourth row stores the indices
5     of the nodes, that are the start and end of the edge. The matrix
6     mid_triangle restores the indices of the midpoints in the rows of
7     every triangle by the columns (by positive mathematical
8     orientation).
9
10    [nt] = size(triangle,2);
11    mid_triangle = zeros(3,nt);
12    midpoints = zeros(4,1);
13    ind_counter = 1;
14
15    for i = 1:nt
16        % determination of the nodes of a triangle:
17        tri = triangle(1:3,i);
18        poi = points(:,tri);
19
20        % evaluation of the midpoints to this triangle:
21        mid_poi = [1/2*(poi(:,1)+poi(:,2)), 1/2*(poi(:,2)+poi(:,3)), ...
22                   1/2*(poi(:,1)+poi(:,3)); tri([1,2]), tri([2,3]), tri([1,3])];
23
24        % verification, if the midpoints have been already calculated:
25        [glob,loc] = ismember(midpoints(1:2,:),mid_poi(1:2,:),'rows');
26        global_ind = find(glob);
27        local_ind = loc(global_ind);
28
29        % case distinction and determination of the vector of midpoints:
30        switch length(global_ind)
31            case 1
32                ind = setdiff([1,2,3],local_ind);
33                mid_triangle(local_ind,i) = global_ind;
34                mid_triangle(ind,i) = [ind_counter,ind_counter+1];
35                midpoints(:,[ind_counter,ind_counter+1]) = mid_poi(:,ind);
36                ind_counter = ind_counter + 2;
37            case 2
38                ind = setdiff([1,2,3],local_ind);
39                mid_triangle(local_ind,i) = global_ind;
40                mid_triangle(ind,i) = ind_counter;
41                midpoints(:,ind_counter) = mid_poi(:,ind);
42                ind_counter = ind_counter + 1;
43            case 3
44                mid_triangle(local_ind,i) = global_ind;
45                otherwise
46                    mid_triangle(:,i) = [ind_counter,ind_counter+1,ind_counter+2];
47                    midpoints(:,ind_counter:ind_counter+2) = mid_poi;
48                    ind_counter = ind_counter + 3;
49        end
50    end
51 end

```

Code D.13: Bestimmung der Mittelpunkte und Zuordnung zu den Dreiecken

D. Quellcode

```

1 function j_E =
2     normal_flux(E_p, nodes, triangles, edges, edge_triangles, uS_values)
3 %NORMALFLUX computes the normal flux for all given edges E \in E_p.
4     The other given objects are: The nodes of the triangulation , the
5     indices of the triangles-nodes ordering , the
6     midpoints/edges-matrix edges , the edges-triangle-ordering
7     edge_triangle and the functionvalues of the Galerkin solution
8     uS_values .
9
10    % Initializing:
11    j_E = zeros(size(E_p));
12
13    % Evaluate the neigbours of all edges in the edges-set E_p:
14    [neighbours, flag] = neighbourhood(E_p, edge_triangles, 'edges');
15
16    % Computation of the single normal fluxes:
17    for k = 1:length(E_p)
18        % Evaluation of the edge-points:
19        edge_poi_ind = edges(3:4,E_p(k));
20        edge_poi = nodes(:,edge_poi_ind);
21
22        % Calculation of the gradient of u_S on T_1 and T_2:
23        neigh_tri_ind = neighbours(:,k);
24        neigh_tri = triangles(1:3,neigh_tri_ind);
25        p_T = nodes(:,neigh_tri);
26        uS_T = uS_values(neigh_tri);
27
28        p_T1 = p_T(:,1:3);
29        p_T2 = p_T(:,4:6);
30        uS_T1 = uS_T(:,1);
31
32        if flag(k) == 0
33            uS_T2 = zeros(3,1);
34        else
35            uS_T2 = uS_T(:,2);
36        end
37
38        graduS_T = [gradu(p_T1,uS_T1);gradu(p_T2,uS_T2)];
39
40        % the normalvector from T_1 to T_2:
41        connect = edge_poi(:,2)-edge_poi(:,1);
42        orth_connect = [-connect(2);connect(1)];
43        n = 1/norm(orth_connect)*orth_connect;
44
45        % Verification , if n shows from T_1 to T_2:
46        p3_T1 = setdiff(p_T1',edge_poi','rows')';
47        edge_test = (p3_T1-edge_poi(:,1))';
48
49        if edge_test*n > 0
50            n = -n;
51        end
52
53        normal = graduS_T*n;
54        j_E(k) = normal(2)-normal(1);
55    end
56
57
```

Code D.14: Berechnung der Normalflüsse j_E für alle $E \in \mathcal{E}_p$

D. Quellcode

```

1 function [osc1_val,osc1_vec] =
2     osc1(N0plus_set,obstacle_values,nodes,triangles,uS_values)
3 %OSC1 evaluates the obstacle oscillation osc_1(u_S,phi). The general
4 % condition in this case is that psi is affine.
5
6 % Initializing:
7 osc1_vec = zeros(length(nodes),1);
8
9 % Evaluation of the sum over the points of N^{0+}:
10 for i = 1:length(N0plus_set)
11     % the help value int_h for the integral of the gradient:en:
12     int_h = 0;
13     % evaluating the support of the shape funktions and the index of
14     % the local shape function:
15     [~,w_p] = find(triangles(1:3,:)==N0plus_set(i));
16
17     % computation of the single norms (integrals):
18     for j = 1:length(w_p)
19         % nodes of the triangle , Jacobian and factors for the affine
20         % trafo:
21         p_index = triangles(1:3,w_p(j));
22         mypoi = nodes(:,p_index);
23         x = mypoi(1,:);
24         y = mypoi(2,:);
25         J = (x(2)-x(1))*(y(3)-y(1)) - (x(3)-x(1))*(y(2)-y(1));
26         a = 1/J * ((x(3)-x(1))^2 + (y(3)-y(1))^2);
27         b = -1/J * ((y(2)-y(1))*(y(3)-y(1)) +
28             (x(2)-x(1))*(x(3)-x(1)));
29         c = 1/J * ((x(2)-x(1))^2 + (y(2)-y(1))^2);
30
31         % evaluate the gradient of psi and u_S:
32         grad_psi = gradu(mypoi,obstacle_values(p_index));
33         grad_u = gradu(mypoi,uS_values(p_index));
34
35         % transformation of the gradients onto the reference element:
36         grad_psi = [x(2)-x(1), y(2)-y(1); x(3)-x(1),
37                     y(3)-y(1)]*grad_psi';
38         grad_u = [x(2)-x(1), y(2)-y(1); x(3)-x(1), y(3)-y(1)]*grad_u';
39
40         % to integrate the gradients , we just multiplicate the
41         % area of the reference element with the high (the
42         % functionvalue) , because the gradients are constant:
43         int_h = int_h + 1/2*(a*grad_psi(1)^2+2*b*grad_psi(1)*
44                             *grad_psi(2)+c*grad_psi(2)^2-2*(a*grad_psi(1)*grad_u(1)*
45                             *grad_psi(2)+b*(grad_psi(1)*grad_u(2)+grad_psi(2)*grad_u(1))...
46                             +c*grad_psi(2)*grad_u(1))+a*grad_u(1)^2+2*b*(grad_u(1)*
47                             *grad_u(2))+c*grad_u(2)^2);
48     end
49
50     osc1_vec(N0plus_set(i)) = int_h;
51 end
52
53 % square root of the sum of the integrals:
54 osc1_val = sqrt(sum(osc1_vec));
55
56 end

```

Code D.15: Bestimmung der Oszillation $\text{osc}_1(u_S, \psi)$

D. Quellcode

```

1 function [osc2_val,osc2_vec] = osc2(Nplusplus_set,N0minus_set,
2 nodes,triangles,edges,f_load)
%OSC2 evaluates the oscillation osc_2(u_S,psi,f).
3
4 % initialization:
5 np = length(nodes);
6 osc2_vec = zeros(np,1);
7 N_set = 1:np;
8 N_sum2 = setdiff(N_set,union(Nplusplus_set,N0minus_set));
9
10 % evaluations of h_P for the two sums of osc_2:
11 function h_P = eval_hP(set,global_nodes,global_edges)
12 % initialization:
13 h_P = zeros(size(set));
14
15 for l = 1:length(h_P)
16 % computing of the edges, which contain p:
17 [~,E_p] = find(global_edges(3:4,:)==set(l));
18
19 % calculation of the lengths of E in E_p:
20 points_1 = global_nodes(:,global_edges(3,E_p));
21 points_2 = global_nodes(:,global_edges(4,E_p));
22 points_diff = points_1 - points_2;
23 h_P(l) = max(sqrt(points_diff(1,:).^2 + points_diff(2,:).^2));
24 end
25
26 h_P1 = eval_hP(Nplusplus_set,nodes,edges);
27 h_P2 = eval_hP(N_sum2,nodes,edges);
28
29 % evaluating of the sums:
30 for i = 1:length(Nplusplus_set)
31 int_h = 0;
32 % support of phi_p, that is the indices of the triangles:
33 [~,w_p] = find(triangles(1:3,:)==Nplusplus_set(i));
34
35 % computing of the mean-values f_p:
36 area_wp = 0;
37 intfP_h = 0;
38 for k = 1:length(w_p)
39 % local points of the considered triangle and the Jacobian:
40 mypoi = nodes(:,triangles(1:3,w_p(k)));
41 x = mypoi(1,:);
42 y = mypoi(2,:);
43 J = (x(2)-x(1))*(y(3)-y(1))-(x(3)-x(1))*(y(2)-y(1));
44 % evaluating the Gauss-points for the quadrature:
45 [wi,gauss,~] = quad_tri(mypoi,@(x,y) 0,7);
46 % quadrature:
47 intfP_h = intfP_h + J *
48 sum(wi.*f_load(gauss(1,:),gauss(2,:)).^2);
49 % computing of |w_p|:
50 area_wp = area_wp + J/2;
51 end
52 f_P = 1/area_wp*intfP_h;
53
54 % calculation of the norm:
55 for j = 1:length(w_p)
56 % local points of the considered triangle and the Jacobian:
57 mypoi = nodes(:,triangles(1:3,w_p(j)));
58 x = mypoi(1,:);
59 y = mypoi(2,:);
60 J = (x(2)-x(1))*(y(3)-y(1))-(x(3)-x(1))*(y(2)-y(1));

```

D. Quellcode

```

60      % evaluating the Gauss-points for the quadrature:
61      [wi,gauss,~] = quad_tri(mypoi,@(x,y) 0,7);
62      % quadrature:
63      int_h = int_h + J * sum(wi.*f_load(gauss(1,:),gauss(2,:))...
64          - f_P).^2);
65      end
66
67      osc2_vec(Nplusplus_set(i)) =
68          osc2_vec(Nplusplus_set(i))+h_P1(i)^2*int_h;
69  end
70
71  for i = 1:length(N_sum2)
72      int_h = 0;
73      % support of phi_p, that is the indices of the triangles:
74      [~,w_p] = find(triangles(1:3,:)==N_sum2(i));
75
76      % calculation of the norm:
77      for j = 1:length(w_p)
78          % local points of the considered triangle and the Jacobian:
79          mypoi = nodes(:,triangles(1:3,w_p(j)));
80          x = mypoi(1,:);
81          y = mypoi(2,:);
82          J = (x(2)-x(1))*(y(3)-y(1))-(x(3)-x(1))*(y(2)-y(1));
83          % evaluating the Gauss-points for the quadrature:
84          [wi,gauss,~] = quad_tri(mypoi,@(x,y) 0,7);
85          % quadrature:
86          int_h = int_h + J * sum(wi.*f_load(gauss(1,:),gauss(2,:)).^2);
87      end
88
89      osc2_vec(N_sum2(i)) = osc2_vec(N_sum2(i))+h_P2(i)^2*int_h;
90  end
91
92  osc2_val = sqrt(sum(osc2_vec));
93
94

```

Code D.16: Berechnung der Oszillationsterme $\text{osc}_2(u_S, \psi, f)$

```

1 function [wi,gauss,ansatz_values] =
2     quad_tri(points,ansatz_fun,num_of_nodes)
3 %QUAD_TRI computes the weights, Gauss-points and functionvalues of
4 %the shape functions, which are needed for the quadrature. The
5 %matrix points stores the x-,y-values of the nodes of the
6 %triangle, ansatz_fun a vector of shape functions and num_of_nodes
7 %the number of nodes for the quadrature formula.
8
9 % x- and y-values of the points:
10 x = points(1,:);
11 y = points(2,:);
12
13 switch num_of_nodes
14     % determination of the weights and the local points xi,eta:
15     case 3
16         wi = [1/6,1/6,1/6];
17         local_poi = [1/2,1/2,0;0,1/2,1/2];
18         xi = local_poi(1,:);
19         eta = local_poi(2,:);
20
21     case 7
22         wh = [(155-sqrt(15))/2400,(155+sqrt(15))/2400];
23
24         wi = [9/80,wh(1),wh(1),wh(1),wh(2),wh(2),wh(2)];
25         local_poi = [1/3,(6-sqrt(15))/21,(9+2*sqrt(15))/21,...
```

D. Quellcode

```

21      (6-sqrt(15))/21,(6+sqrt(15))/21,(9-2*sqrt(15))/21,...  

22      (6+sqrt(15))/21;1/3,(6-sqrt(15))/21,(6-sqrt(15))/21,...  

23      (9+2*sqrt(15))/21,(6+sqrt(15))/21,(6+sqrt(15))/21,...  

24      (9-2*sqrt(15))/21];  

25      xi = local_poi(1,:);  

26      eta = local_poi(2,:);  

27  

28      otherwise  

29          error('keine Quadraturformel bekannt');  

30      end  

31  

32 % evaluation of the Gauss-points by using xi and eta with the points  

33 % x and y:  

34 gauss(1,:) = x(1)+(x(2)-x(1))*xi+(x(3)-x(1))*eta;  

35 gauss(2,:) = y(1)+(y(2)-y(1))*xi+(y(3)-y(1))*eta;  

36  

37 % computing the functionvalues of the shape functions in the local  

38 % coordinates:  

39 ansatz_values = ansatz_fun(xi,eta);  

40

```

Code D.17: Gewichte und Stützstellen für die Quadratur

```

1 function [u_S,points,edges,triangles,midtri,midpoints,rhoS_plot,IQ_plot,  

2 J_error,osc_term,osc1_term,osc2_term,recursion_depth,  

3 degree_of_freedom,time_vec] = adaptive_refinement_solution  

4 (points,edges,triangles,solution,load_fun,obstacle,geo_data,J_exact  

5 max_error,para_rho,para_osc,max_points,max_recursion)  

6 %ADAPTIVE_REFINEMENT SOLUTION uses the adaptive refinement strategy  

7 % shown  

8 %in chapter 4 and evaluates the solution on a adaptive refined mesh.  

9  

10 % initializing all local values:  

11 u_S = solution;  

12 J_u = J_exact;  

13 rhoS_plot = zeros(max_recursion,1);  

14 IQ_plot = zeros(max_recursion,1);  

15 J_error = zeros(max_recursion,1);  

16 osc_term = zeros(max_recursion,1);  

17 osc1_term = zeros(max_recursion,1);  

18 osc2_term = zeros(max_recursion,1);  

19 recursion_depth = 1;  

20 time_vec = zeros(max_recursion,1);  

21 degree_of_freedom = zeros(max_recursion,1);  

22  

23 while 1  

24     tic  

25     % further initializations:  

26     np = size(points,2);  

27     degree_of_freedom(recursion_depth) = np;  

28  

29     % evaluation of the midpoints:  

30     [midpoints,midtri] = midpoints_of_triangle(triangles,points);  

31     nmp = size(midpoints,2);  

32  

33     % computation of the functionvalues of the obstacle onto the mesh  

34     % nodes and midpoints:  

35     z_obs_prob = obstacle(points(1,:),points(2,:));  

36     z_obs_midpoints = obstacle(midpoints(1,:),midpoints(2,:));

```

D. Quellcode

```

31
32 if size(z_obs_prob,1) == 1
33 z_obs_prob = z_obs_prob';
34 z_obs_midpoints = z_obs_midpoints';
35 end
36
37 % assembling of the matrix/vector data and the evaluation of the
38 % Dirichlet boundary data:
39 [A,f] = assemble(points,triangles,load_fun,7,'linear');
40 [~,~,H,R]=assemb(geo_data.mygeom,points,edges);
41
42 % solution of the variational inequality with
43 % active-set/inner-points-method:
44 u_S = sparse(u_S);
45 z_obs_prob = sparse(z_obs_prob);
46 opts = optimset('Algorithm','interior-point-convex','LargeScale',
47 'on','Display','off');
48 [u_S,J_uS] = quadprog(A,-f,[],[],H,R,z_obs_prob,[],u_S,opts);
49
50 % computing the functionvalues of u_S onto the midpoints:
51 u_S_mid = zeros(nmp,1);
52
53 for j = 1 : nmp
54 index = midpoints([3,4],j);
55 u_S_mid(j) = (u_S(index(1))+u_S(index(2)))/2;
56 end
57
58 % the solution of the local defect problem by assembling the
59 % matrix with the bubble functions and using the equations in
60 % (4.10) and (4.11):
61 [A_Q,rhoS_phiE] =
62 assemble(points,triangles,load_fun,7,'bubble',u_S);
63 [eps_V,rho_E,d_E,~] = defect_problem_solution(points,triangles,
64 midtri,rhoS_phiE,u_S_mid,z_obs_midpoints);
65
66 % the hierarchical error estimator: evaluation of rho_S(eps_V)
67 % with the equation beyond (4.68):
68 rhoS_glob = eps_V * rhoS_phiE;
69 rhoS_plot(recursion_depth) = rhoS_glob;
70
71 % computation of -I_Q(eps_V) with (4.6):
72 IQ_plot(recursion_depth) = -1/2*(eps_V.^2) * diag(A_Q) + rhoS_glob;
73
74 % calculation of the error of -I(e):
75 J_error(recursion_depth) = J_uS - J_u;
76
77 % evaluating the local contributions of rho_S with Lemma 4.14:
78 rho_p = eval_rho_p(points,triangles,midpoints,midtri,u_S,eps_V,
79 load_fun);
80
81 % determination of the sets N0, N0+, N+, N++, N0-
82 % for the oscillationterms:
83 inner_points_omega = inner_points(H);
84 N0_set = N0(u_S,inner_points_omega,z_obs_prob);
85 Nplus_set = Nplus(N0_set,inner_points_omega,points);
86 [N0plus_set,N0minus_set] = N0plusminus(N0_set,points,
87 triangles,midpoints,midtri,load_fun,obstacle,u_S);
88 Nplusplus_set = Nplusplus(Nplus_set,midpoints,rho_E,d_E);
89
90 % evaluation of the oscillationterms:

```

D. Quellcode

```

81      [osc1_term(recursion_depth), osc1_local] =
82          osc1(N0plus_set, z_obs_prob, points, triangles, u_S);
83      [osc2_term(recursion_depth), osc2_local] =
84          osc2(Nplusplus_set, N0minus_set, points,
85              triangles, midpoints, load_fun);
86      osc_local = osc1_local + osc2_local;
87      osc_term(recursion_depth) = sqrt(osc1_term(recursion_depth)^2 +
88          osc2_term(recursion_depth)^2);
89
90      % calculating the indices of the triangles, which have to be
91      % refined:
92      refine_triangle = find_triangle_refinement(rho_p, rhoS_glob,
93          osc_local, osc_term(recursion_depth), triangles, para_rho,
94          para_osc, 'symmetric');
95
96      % refinement of the mesh:
97      [p_h, e_h, t_h, uS_h] = refinemesh(geo_data.mygeom, points, edges,
98          triangles, u_S, refine_triangle);
99
100     % termination criterion: if the number of the nodes is too large,
101     % no triangle will be refined or the hierarchical error
102     % estimator is small enough:
103     if isempty(refine_triangle) || rhoS_glob < max_error ||
104         recursion_depth == max_recursion || length(p_h) > max_points)
105         length(p_h)
106         fprintf('%s %f.\n', 'Die Rekursionstiefe ist ',
107             recursion_depth);
108         break;
109     else
110         points = p_h;
111         edges = e_h;
112         triangles = t_h;
113         u_S = uS_h;
114         recursion_depth = recursion_depth + 1;
115     end
116     time_vec(recursion_depth) = toc;
117 end
118
119 % elimination of the zeros in the vectors of the error/-estimator:
120 rhoS_plot = rhoS_plot(1:recursion_depth);
121 IQ_plot = IQ_plot(1:recursion_depth);
122 J_error = J_error(1:recursion_depth);
123 osc_term = osc_term(1:recursion_depth);
124 osc1_term = osc1_term(1:recursion_depth);
125 osc2_term = osc2_term(1:recursion_depth);
126 degree_of_freedom = degree_of_freedom(1:recursion_depth);
127
128 end

```

Code D.18: Adaptive Verfeinerung des Gitters und Lösung des Hindernisproblems

```

1 clear
2 clear all
3 clc
4
5 % loading of the geometry data (non-constant boundary):
6 data = load('square_with_unconst_dirichlet.mat');
7 % loadfunction f (here contant):
8 fun = @(x,y) -2*ones(size(x));

```

D. Quellcode

```

9 % loading the exakt data for the given problem:
10 data_exact = load('fval-log-u.mat');
11 J_u = data_exact.fval;
12 % obstacle function:
13 my_obstacle = @(x,y) zeros(size(x));
14
15 % initializing the mesh:
16 h = 2;
17 [p,e,t] = initmesh(data.mygeomg,'Hmax',h); %square: [-1,1]^2
18
19 % initialization of the global values:
20 u_S = [];
21 itermax = 5; % maximum iteration depth
22 nmax = 1000000; % maximum number of nodes
23 eps = 0.001; % upper bound for the hierarchical error
24 estimate
25 theta_rho = 0.4; % contraction parameter for local contributions
26 of the error estimate
27 theta_osc = 0.3; % contraction parameter for local contributions
28 of the oscillations
29
30 tic
31 % adaptive algorithm:
32 [u_S,p,e,t,midtri,midpoints,rhoS_plot,IQ_plot,J_error,osc_term,
33 osc1_term,osc2_term,recursion_depth,degree_of_freedom] =
34 adaptive_refinement_solution(p,e,t,u_S,fun,my_obstacle,
35 data,J_u,eps,theta_rho,theta_osc,nmax,itermax);
36 toc
37
38 % plot of the mesh with the nodes and midpoints/edges:
39 figure(1)
40 subplot(2,1,1);pdemesh(p,e,t);
41 title('numbering of the nodes and triangles','FontSize',12);
42
43 ntri = size(t,2);
44 np = size(p,2);
45
46 for j = 1 : ntri
47 tri = t(1:3,j);
48 poi = p(:,tri);
49 adv = (poi(:,1)+poi(:,2)+poi(:,3))/3;
50 text(adv(1),adv(2), num2str(j), 'FontSize',9);
51 end
52
53 for i = 1 : np
54 text(p(1,i),p(2,i), num2str(i), 'FontSize',9);
55 end
56
57 subplot(2,1,2);pdemesh(p,e,t);
58 title('numbering of the edges/midpoints','FontSize',12);
59
60 for j = 1 : ntri
61 tri = midtri(1:3,j);
62 poi = midpoints(:,tri);
63 adv = (poi(:,1)+poi(:,2)+poi(:,3))/3;
64 text(adv(1),adv(2), num2str(j), 'FontSize',9);
65 end
66
67 for i = 1 : length(midpoints)
68 text(midpoints(1,i),midpoints(2,i), num2str(i), 'FontSize',9);
69 end

```

D. Quellcode

```

65 % plot of the error and the error estimator:
66 figure(2);
67 subplot(2,1,1);
68 plot(1:recursion_depth,osc1_term,:o',1:recursion_depth,osc2_term,
69      '-.*',1:recursion_depth,osc_term,:x');
70 ymin = min([min(osc_term),min(osc1_term),min(osc2_term)])-5;
71 ymax = max([max(osc_term),max(osc1_term),max(osc2_term)])+5;
72 axis([0.5,recursion_depth+0.5,ymin,ymax]);
73 legend('osc1','osc2','oscillation','location','best');

74 subplot(2,1,2);
75 plot(1:recursion_depth,J_error,'--o',...
76      1:recursion_depth,IQ_plot,'-.*',1:recursion_depth,rhoS_plot,'-.x');
77 ymin = min([min(J_error),min(IQ_plot),min(rhoS_plot)])-0.5;
78 ymax = max([max(J_error),max(IQ_plot),max(rhoS_plot)])+0.5;
79 axis([0.5,recursion_depth+0.5,ymin,ymax]);
80 legend('functional error','estimated error','error
81      indicator','location',...
82      'best');

83 % plot of the solution:
84 u_S = full(u_S);
85
86 figure(3);
87 pdeplot(p,e,t,'xydata',u_S,'zdata',u_S,'mesh','on','colormap',
88         'jet','colorbar','off');
89 title('solution of the obstacle problem','FontSize',15)

90 figure(4);
91 pdeplot(p,e,t,'zdata',u_S);
92 title('solution of the obstacle problem','FontSize',15)

```

Code D.19: Startdatei des Beispiels 6.1 für das Hindernisproblem

```

1 function [J_error,rhoS_plot,IQ_plot,osc_term,osc1_term,osc2_term,
2 degree_of_freedom,time] = start_example2
3
4 clear
5 clear all
6
7 % loading of the geometry data (non-constant boundary):
8 data = load('mylshape.mat');
9 % loadfunction f (here constant):
10 function z = my_fun(x,y)
11     [m,n] = size(x);
12     z = zeros(m,n);
13     r = sqrt(x.^2+y.^2);
14     r_new = 2*r-1/2;
15
16     index_gamma1 = find(sqrt(x.^2+y.^2)>=1/4 &
17                         sqrt(x.^2+y.^2)<3/4 & y>=0);
18
19     z(index_gamma1) = -(r(index_gamma1)).^(2/3)...
20         .* sin(2/3*atan2(y(index_gamma1),x(index_gamma1)))...
21         .* (1./r(index_gamma1)).*(-60*r_new(index_gamma1).^4+120*...
22             r_new(index_gamma1).^3-60*r_new(index_gamma1).^2)+(-480*...
23             r_new(index_gamma1).^3+720*r_new(index_gamma1).^2-240*...
24             r_new(index_gamma1))-4/3*r(index_gamma1).^(1/3).*(-60*...
25             r_new(index_gamma1).^4+120*r_new(index_gamma1).^3-60*...
26             r_new(index_gamma1).^2).*sin(2/3*atan2(y(index_gamma1),...
27             x(index_gamma1)));

```

D. Quellcode

```

26
27     index_gamma1 = find(sqrt(x.^2+y.^2)>=1/4 &
28         sqrt(x.^2+y.^2)<3/4 & y<0);
29
30     z(index_gamma1) = -(r(index_gamma1)).^(2/3)...
31         .* sin(2/3*(atan2(y(index_gamma1),x(index_gamma1))+2*pi))...
32         .*(1./r(index_gamma1).*(-60*r_new(index_gamma1).^4+120*...
33             r_new(index_gamma1).^3-60*r_new(index_gamma1).^2)+(-480*...
34             r_new(index_gamma1).^3+720*r_new(index_gamma1).^2-240*...
35             r_new(index_gamma1))-4/3*r(index_gamma1).^(1/3).*(-60*...
36             r_new(index_gamma1).^4+120*r_new(index_gamma1).^3-60*...
37             r_new(index_gamma1).^2).*sin(2/3*(atan2(y(index_gamma1),...
38                 x(index_gamma1))+2*pi));
39
40     index_gamma2 = find(sqrt(x.^2+y.^2)>5/4);
41     z(index_gamma2) = -1;
42 end
43 fun = @(x,y) my_fun(x,y);
44 % loading the exakt data for the given problem
45 J_u = -0.5;
46 % obstacle function:
47 my_obstacle = @(x,y) zeros(size(x));
48
49 % initializing the mesh:
50 h = 2;
51 [p,e,t]=initmesh(data.mygeomg,'Hmax',h,'jiggle','on','MesherVersion',...
52 'R2013a');
53 [p,e,t] = refinemesh(data.mygeomg,p,e,t);
54 [p,e,t] = refinemesh(data.mygeomg,p,e,t);
55
56 % initialization of the global values:
57 u_S = [];
58 itermax = 5;           % maximum iteration depth
59 nmax = 25000;          % maximum number of nodes
60 eps = 0.01;            % upper bound for the hierarchical error
61 estimate
62 theta_rho = 0.3;       % contraction parameter for local contributions
63 of the error estimate
64 theta_osc = 0.3;       % contraction parameter for local contributions
65 of the oscillations
66
67 tic
68 % adaptive algorithm:
69 [u_S,p,e,t,midtri,midpoints,rhoS_plot,IQ_plot,J_error,osc_term,
70 osc1_term,osc2_term,recursion_depth,degree_of_freedom,time] =
71 adaptive_refinement_solution(p,e,t,u_S,fun,my_obstacle,
72 data,J_u,eps,theta_rho,theta_osc,nmax,itermax);
73 toc
74
75 % plot of the mesh with the nodes and midpoints/edges:
76 figure(1)
77 subplot(2,1,1);pdemesh(p,e,t);
78 title('numbering of the nodes and triangles','FontSize',12);
79
80 ntri = size(t,2);
81 np = size(p,2);
82
83 for j = 1 : ntri
84     tri = t(1:3,j);
85     poi = p(:,tri);
86     adv = (poi(:,1)+poi(:,2)+poi(:,3))/3;

```

D. Quellcode

```

79     text (adv(1),adv(2), num2str(j), 'FontSize',9);
80 end
81
82 for i = 1 : np
83     text(p(1,i),p(2,i), num2str(i), 'FontSize',9);
84 end
85
86 subplot(2,1,2);pdemesh(p,e,t);
87 title('numbering of the edges/midpoints','FontSize',12);
88
89 for j = 1 : ntri
90     tri = midtri(1:3,j);
91     poi = midpoints(:,tri);
92     adv = (poi(:,1)+poi(:,2)+poi(:,3))/3;
93     text(adv(1),adv(2), num2str(j), 'FontSize',9);
94 end
95
96 for i = 1 : length(midpoints)
97     text(midpoints(1,i),midpoints(2,i), num2str(i), 'FontSize',9);
98 end
99
100
101 % plot of the error and the error estimator:
102 figure(2);
103 subplot(2,1,1);
104 plot(1:recursion_depth,osc1_term,'o',1:recursion_depth,osc2_term,
105      '-.*',1:recursion_depth,osc_term,'x');
106 ymin = min([min(osc_term),min(osc1_term),min(osc2_term)])-5;
107 ymax = max([max(osc_term),max(osc1_term),max(osc2_term)])+5;
108 axis([0.5,recursion_depth+0.5,ymin,ymax]);
109 legend('osc1','osc2','oscillation','location','best');
110 subplot(2,1,2);
111 plot(1:recursion_depth,J_error,'-o',...
112      1:recursion_depth,IQ_plot,'-.*',1:recursion_depth,rhoS_plot,'-x');
113 ymin = min([min(J_error),min(IQ_plot),min(rhoS_plot)])-0.02;
114 ymax = max([max(J_error),max(IQ_plot),max(rhoS_plot)])+0.02;
115 axis([0.5,recursion_depth+0.5,ymin,ymax]);
116 legend('functional error','estimated error','error
117 indicator','location',...
118 'best');
119
120 % plot of the solution:
121 u_S = full(u_S);
122
123 figure(3);
124 pdeplot(p,e,t,'xydata',u_S,'zdata',u_S,'mesh','on','colormap',
125         'jet','colorbar','off');
126 title('solution of the obstacle problem','FontSize',15)
127
128 figure(4);
129 pdeplot(p,e,t,'zdata',u_S);
130 title('solution of the obstacle problem','FontSize',15)
131
132 end

```

Code D.20: Startdatei des Beispiels 6.2 für das Hindernisproblem

D. Quellcode

```

1 function [ J_error , rhoS_plot , IQ_plot , osc_term , osc1_term , osc2_term ,
2 degree_of_freedom , time] = start_example3
3
4 clear
5 clear all
6 clc
7
8 % loading of the geometry data (non-constant boundary):
9 data = load('mylshape.mat');
10 % loadfunction f (here contant):
11 function z = my_fun(x,y)
12     [m,n] = size(x);
13     z = zeros(m,n);
14     r = sqrt(x.^2+y.^2);
15     r_new = 2*r-1/2;
16
17     index_gamma1 = find(sqrt(x.^2+y.^2)>=1/4 &
18                         sqrt(x.^2+y.^2)<3/4 & y>=0);
19
20     z(index_gamma1) = - (r(index_gamma1)).^(2/3) ...
21                         .* sin(2/3*atan2(y(index_gamma1),x(index_gamma1))) ...
22                         .* (1./r(index_gamma1).*(-60*r_new(index_gamma1)).^4+120*...
23                               r_new(index_gamma1).^3-60*r_new(index_gamma1).^2)+(-480*...
24                               r_new(index_gamma1).^3+720*r_new(index_gamma1).^2-240*...
25                               r_new(index_gamma1))-4/3*r(index_gamma1).^(-1/3).*(-60*...
26                               r_new(index_gamma1).^4+120*r_new(index_gamma1).^3-60*...
27                               r_new(index_gamma1).^2).*sin(2/3*atan2(y(index_gamma1),...
28                                         x(index_gamma1)));
29
30     index_gamma1 = find(sqrt(x.^2+y.^2)>=1/4 &
31                         sqrt(x.^2+y.^2)<3/4 & y<0);
32
33     z(index_gamma1) = - (r(index_gamma1)).^(2/3) ...
34                         .* sin(2/3*(atan2(y(index_gamma1),x(index_gamma1))+2*pi)) ...
35                         .* (1./r(index_gamma1).*(-60*r_new(index_gamma1)).^4+120*...
36                               r_new(index_gamma1).^3-60*r_new(index_gamma1).^2)+(-480*...
37                               r_new(index_gamma1).^3+720*r_new(index_gamma1).^2-240*...
38                               r_new(index_gamma1))-4/3*r(index_gamma1).^(-1/3).*(-60*...
39                               r_new(index_gamma1).^4+120*r_new(index_gamma1).^3-60*...
40                               r_new(index_gamma1).^2).*sin(2/3*(atan2(y(index_gamma1),...
41                                         x(index_gamma1))+2*pi));
42
43     index_gamma2 = find(sqrt(x.^2+y.^2)>5/4);
44     z(index_gamma2) = - 1;
45
46     z = -z;
47 end
48 fun = @(x,y) my_fun(x,y);
49 % loading the exakt data for the given problem
50 J_u = -0.8250;
51 % obstacle function:
52 function z = obs_fun(x,y)
53     [m,n] = size(x);
54     z = zeros(m,n);
55
56     for k = 1:m
57         for l = 1:n
58             z(k,l) = -0.5*(2.01-min([2-x(k,l);2+x(k,l);...
59                               2+y(k,l);2-y(k,l)]));
60         end
61     end
62 end

```

D. Quellcode

```

56     end
57 my_obstacle = @(x,y) obs_fun(x,y);
58
59 % initializing the mesh:
60 h = 2;
61 [p,e,t]=initmesh(data.mygeomg,'Hmax',h,'jiggle','on','MesherVersion',
62                   'R2013a');
63 [p,e,t] = refinemesh(data.mygeomg,p,e,t);
64 [p,e,t] = refinemesh(data.mygeomg,p,e,t);
65
66 % initialization of the global values:
67 u_S = [];
68 itermax = 9;           % maximum iteration depth
69 nmax = 150000;         % maximum number of nodes
70 eps = 0.0001;          % upper bound for the hierarchical error
71             estimate
72 theta_rho = 0.3;       % contraction parameter for local contributions
73             of the error estimate
74 theta_osc = 0.3;       % contraction parameter for local contributions
75             of the oscillations
76
77 tic
78
79 % adaptive algorithm:
80 [u_S,p,e,t,midtri,midpoints,rhoS_plot,IQ_plot,J_error,osc_term,
81 osc1_term,osc2_term,recursion_depth,degree_of_freedom,time] =
82 adaptive_refinement_solution(p,e,t,u_S,fun,my_obstacle,
83 data,J_u,eps,theta_rho,theta_osc,nmax,itermax);
84 toc
85
86
87 % plot of the mesh with the nodes and midpoints/edges:
88 figure(1)
89 subplot(2,1,1);pdemesh(p,e,t);
90 title('numbering of the nodes and triangles','FontSize',12);
91
92 ntri = size(t,2);
93 np = size(p,2);
94
95 for j = 1 : ntri
96     tri = t(1:3,j);
97     poi = p(:,tri);
98     adv = (poi(:,1)+poi(:,2)+poi(:,3))/3;
99     text(adv(1),adv(2), num2str(j), 'FontSize',9);
100 end
101
102 for i = 1 : np
103     text(p(1,i),p(2,i), num2str(i), 'FontSize',9);
104 end
105
106 subplot(2,1,2);pdemesh(p,e,t);
107 title('numbering of the edges/midpoints','FontSize',12);
108
109 for j = 1 : ntri
110     tri = midtri(1:3,j);
111     poi = midpoints(:,tri);
112     adv = (poi(:,1)+poi(:,2)+poi(:,3))/3;
113     text(adv(1),adv(2), num2str(j), 'FontSize',9);
114 end
115
116 for i = 1 : length(midpoints)
117     text(midpoints(1,i),midpoints(2,i), num2str(i), 'FontSize',9);
118 end

```

D. Quellcode

```

111
112
113 % plot of the error and the error estimator:
114 figure(2);
115 subplot(2,1,1);
116 plot(1:recursion_depth,osc1_term,:o',1:recursion_depth,osc2_term,
117      '-.*',1:recursion_depth,osc_term,:x');
118 ymin = min([min(osc_term),min(osc1_term),min(osc2_term)])-5;
119 ymax = max([max(osc_term),max(osc1_term),max(osc2_term)])+5;
120 axis([0.5,recursion_depth+0.5,ymin,ymax]);
121 legend('osc1','osc2','oscillation','location','best');
122 subplot(2,1,2);
123 plot(1:recursion_depth,J_error,'--o',...
124      1:recursion_depth,IQ_plot,'-.*',1:recursion_depth,rhoS_plot,'-.x');
125 ymin = min([min(J_error),min(IQ_plot),min(rhoS_plot)])-0.02;
126 ymax = max([max(J_error),max(IQ_plot),max(rhoS_plot)])+0.02;
127 axis([0.5,recursion_depth+0.5,ymin,ymax]);
128 legend('functional error','estimated error','error
129 indicator','location',...
130 'best');
131
132 % plot of the solution:
133 u_S = full(-u_S);
134
135 figure(8);
136 pdeplot(p,e,t,'xydata',u_S,'zdata',u_S,'mesh','on','colormap',
137      'jet','colorbar','off');
138 title('solution of the obstacle problem','FontSize',15)
139
140 figure(9);
141 pdeplot(p,e,t,'zdata',u_S);
142 title('solution of the obstacle problem','FontSize',15)
143
144 end

```

Code D.21: Startdatei des Beispiels 6.3 für das Hindernisproblem

D.2 Implementierung des Fehlerschätzers für das Kontaktproblem

Für den Quellcode des Kontaktproblems fügen wir nur die Dateien an, die verändert werden mussten für die Übertragung vom Hindernis- zum Kontaktproblem. Die detaillierte Beschreibung ist in Kapitel 5.2 zu finden.

```

1 function [A,f] = assemble(points,edges,triangle,vol_load_x,
2 vol_load_y,surf_load_x,surf_load_y,node_load,neumann_points,lambda,
3 mu,num_of_nodes,option,u_S)
4 %ASSEMBLE evaluates the global matrix A and load vector f out of the
5 % given nodes, triangles, loadfunctions, Neumann-point indices,
6 % Lame-constants, number of nodes and the Galerkin approximation
7 % u_S.
8
9 % ordering: triangles ↔ midpoints:
10 [midpoints,midtriangle] = midpoints_of_triangle(triangle,points);
11 % initialising the dimension and the solution:
12 np = size(points,2);
13 nt = size(triangle,2);

```

D. Quellcode

```

9 nmp = size ( midpoints ,2) ;
10
11 if nargin == 12
12     option = 'linear';
13     u_S = zeros(2*np,1);
14 end
15
16 if nargin == 13
17     u_S = zeros(2*np,1);
18 end
19
20 hat_edge = @(xi) [1/2.*(1-xi); 1/2.*(1+xi)];
21
22 % beginning of the assembling:
23 switch lower(option)
24     case {'linear'}
25         % linear hatfunctionen on the reference-element:
26         hat = @(xi,eta) [1-xi-eta; xi; eta];
27
28         % initialising of the global values:
29         A = sparse(2*np,2*np);
30         f = sparse(2*np,1);
31         my_tri = triangle(1:3,:);
32         neumann_ind = neumann_points;
33
34     case {'bubble', 'quadratic'}
35         % bubblefunctionen on the reference-element:
36         hat = @(xi,eta) [4*xi.*(1-xi-eta); 4*xi.*eta; 4*eta.*(1-xi-eta)];
37
38         % initialising of the global values:
39         A = sparse(2*nmp,2*nmp);
40         f = sparse(2*nmp,1);
41         my_tri = midtriangle;
42         neumann_ind =
43             find ( prod(ismember(midpoints (3:4,:),neumann_points)));
44
45 % loop over the triangles for the assembling:
46 for i = 1:nt
47     poi_ind = triangle(1:3,i);
48     poi = points (:,poi_ind);
49     u_S_loc_x = u_S(2*triangle(1:3,i)-1);
50     u_S_loc_y = u_S(2*triangle(1:3,i));
51     tri = my_tri(:,i);
52
53     if any(poi(2,:)>0)
54         my_mu = mu(1);
55         my_lambda = lambda(1);
56     else
57         my_mu = mu(2);
58         my_lambda = lambda(2);
59     end
60
61     % evaluation of the local linear stiffness matrix and the
62     % Jacobian:
63     [S, fl, J] =
64         local_mat(poi,my_lambda,my_mu,u_S_loc_x,u_S_loc_y,option);
65
66     % Evaluating the local vector fl: (here is Gauss-quadrature over
67     % triangles used)
68     [wi,gauss,ansatz_values] = quad_tri(poi,hat,num_of_nodes);

```

D. Quellcode

```

67 % quadrature over a triangle:
68 for k = 1:3
69     fl(2*k-1) =
70         fl(2*k-1)+J*sum(wi.*vol_load_x(gauss(1,:),gauss(2,:)).*...
71         ansatz_values(k,:));
72     fl(2*k) =
73         fl(2*k)+J*sum(wi.*vol_load_y(gauss(1,:),gauss(2,:)).*...
74         ansatz_values(k,:));
75 end
76
77 local_neumann_ind = ismember(poi_ind,neumann_points);
78 if sum(local_neumann_ind) == 2
79     edge_poi_local_ind = find(local_neumann_ind);
80     edge_poi_ind = poi_ind(edge_poi_local_ind);
81     edge_poi = poi(:,edge_poi_local_ind);
82     edge_ind = find(prod(ismember(edges(1:2,:), edge_poi)));
83     [wi_edge, gauss_edge, J_edge, ansatz_val_edge] =
84         quad_edge(edge_poi, hat_edge, 5);
85
86 for k = 1:3
87     if edges(1,edge_ind) == poi_ind(k)
88         fl(2*k-1) = fl(2*k-1)+J_edge*sum(wi_edge.*
89             surf_load_x(gauss_edge(1,:),gauss_edge
90             (2,:)).*ansatz_val_edge(1,:));
91         fl(2*k) = fl(2*k)+J_edge*sum(wi_edge.*
92             surf_load_y(gauss_edge(1,:),gauss_edge
93             (2,:)).*ansatz_val_edge(1,:));
94     else
95         fl(2*k-1) = fl(2*k-1)+J_edge*sum(wi_edge.*
96             surf_load_x(gauss_edge(1,:),gauss_edge
97             (2,:)).*ansatz_val_edge(2,:));
98         fl(2*k) = fl(2*k)+J_edge*sum(wi_edge.*
99             surf_load_y(gauss_edge(1,:),gauss_edge
100            (2,:)).*ansatz_val_edge(2,:));
101    end
102 end
103
104 % assembling into the global stiffness matrix A and the load
105 % vector f:
106 for k = 1:3
107     for l = 1:3
108         A(2*tri(k)-1:2*tri(k),2*tri(l)-1:2*tri(l)) =
109             A(2*tri(k)-1:2*tri(k),2*tri(l)-1:2*tri(l)) +
110             S(2*k-1:2*k,2*l-1:2*l);
111     end
112
113     f(2*tri(k)-1:2*tri(k)) = f(2*tri(k)-1:2*tri(k))+fl(2*k-1:2*k);
114 end
115
116 switch lower(option)
117     case {'bubble','quadratic'}
118         points = midpoints;
119     end
120     f(2*neumann_ind) = f(2*neumann_ind) +
121         node_load(points(1,neumann_ind),points(2,neumann_ind));
122 end

```

Code D.22: Assemblierung der Steifigkeitsmatrix und des Lastvektors für das Kontaktproblem

D. Quellcode

```
1 function rho_p =
2   eval_rho_p(nodes, triangles, edges, midpoints, midtri, u_S,
3   eps_V, vol_load_x, vol_load_y, surf_load_x, surf_load_y, node_load,
4   neumannInd, lambda, mu)
5 % EVAL_RHO_P evaluates the local contribution rho_P of rho_S, given
6   the nodes, triangles, midpoints of the edges (of the triangles)
7   and die midpoints-triangle-ordering (midtri). Also it is given
8   the solution auf die local defect problem eps_V and the function
9   fun, which is part of the integral in rho_S. u_S are, as always,
10  the Galerkin solution.
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
```

D. Quellcode

```

48      j_E =
49      normal_flux(E_p, flag, nodes, triangles, midpoints, midtri, u_S,
50      lambda, mu);
51
52      for i = 1:length(E_p)
53          % evaluating the points of the edges:
54          edge_poi_ind = midpoints(3:4,E_p(i));
55          edge_poi = nodes(:,edge_poi_ind);
56
57          % affin transformation of the local integral on the
58          % global edge by multiplication of the jacobian:
59          laenge = norm(edge_poi(:,1)-edge_poi(:,2));
60          global_phiPE_int = 1/3*laenge;
61
62          % determination of the functionvalues of eps_V(x_E):
63          epsV_loc = eps_V([2*E_p(i)-1,2*E_p(i)]);
64
65          % adding the line integral to the local contribution
66          % rho_p:
67          rho_p(k) = rho_p(k)+(j_E(:,i)'*epsV_loc)*global_phiPE_int;
68
69          % Evaluation of the boundary integral over gamma-sigma:
70          if prod(ismember(edge_poi_ind,neumann_ind)) == 1
71              edge_ind = find(prod(ismember(edges(1:2,:),edge_poi_ind)));
72              [wi_edge, gauss_edge, J_edge, ansatz_val_edge] =
73                  quad_edge(edge_poi, hat_edge, 5);
74
75              % Gauss-points and local contributions of eps_V:
76              [~,~,~,ansatz_val_E_edge] = quad_edge(edge_poi,@(xi)
77                  (1-xi.^2),5);
78              eps_V_local_x = eps_V(2*E_p(i)-1);
79              eps_V_local_y = eps_V(2*E_p(i));
80
81              if edges(1,edge_ind) == k
82                  rho_p(k) =
83                      rho_p(k)+J_edge*(sum(wi_edge.*surf_load_x
84                      (gauss_edge(:,1),gauss_edge(:,2)).*...
85                      (eps_V_local_x*ansatz_val_E_edge)
86                      .*ansatz_val_edge(:,1)) +
87                      sum(wi_edge.*surf_load_y
88                      (gauss_edge(:,1),gauss_edge(:,2)).*...
89                      (eps_V_local_y*ansatz_val_E_edge)
90                      .*ansatz_val_edge(:,1)));
91
92              else
93                  rho_p(k) =
94                      rho_p(k)+J_edge*(sum(wi_edge.*surf_load_x
95                      (gauss_edge(:,1),gauss_edge(:,2)).*...
96                      (eps_V_local_x*ansatz_val_E_edge)
97                      .*ansatz_val_edge(:,2)) +
98                      sum(wi_edge.*surf_load_y
99                      (gauss_edge(:,1),gauss_edge(:,2)).*...
100                     (eps_V_local_y*ansatz_val_E_edge)
101                     .*ansatz_val_edge(:,2)));
102
103          end
104      end
105  end
106
107 neumann_mid_ind = find(prod(ismember(midpoints(3:4,:),neumann_ind)));
108 node_load_vec =
109     node_load(midpoints(1,neumann_mid_ind),midpoints(2,neumann_mid_ind));

```

D. Quellcode

```

90 adding_vec = node_load_vec .* eps_V(neumann_mid_ind);
91
92 for k = 1:length(adding_vec)
93     % rho_p(neumann_mid_ind(k)) = rho_p(neumann_mid_ind(k)) +
94     % adding_vec(k);
95 end
96 end

```

Code D.23: Berechnung der lokalen Anteile von ρ_S für das Kontaktproblem

```

1 function [S, f_local, J] =
2     local_mat(points, lambda, mu, uS_local_x, uS_local_y, option)
3 %LOCALMAT computes the Jacobian J, a local stiffness matrix S and if
4 %option='bubble' a local vector f_local, which will be needed for
5 %a(u_S,*) in rho_S. LOCALMAT expects the nodes (points) of the
6 %local triangle, the z-values uS_local of this nodes and an
7 %option, which can be 'linear' or 'bubble'.
8
9 % initialization of f_local:
10 f_local = zeros(6,1);
11
12 % x- and y-values of the nodes:
13 x = points(1,:);
14 y = points(2,:);
15
16 % the Jacobian J and other factors for the affine transformation from
17 % the reference element onto a arbitrary triangle:
18 J = (x(2)-x(1))*(y(3)-y(1)) - (x(3)-x(1))*(y(2)-y(1));
19 a = 1/J * (mu*(x(3)-x(1))^2 + (2*mu+lambda)*(y(3)-y(1))^2);
20 b = -1/J * (mu*(x(3)-x(1))*(x(2)-x(1)) +
21     (2*mu+lambda)*(y(3)-y(1))*(y(2)-y(1)));
22 c = -1/J * (mu*(y(3)-y(1))*(y(2)-y(1)) +
23     (2*mu+lambda)*(x(3)-x(1))*(x(2)-x(1)));
24 d = 1/J * (mu*(x(3)-x(1))*(y(2)-y(1)) +
25     lambda*(y(3)-y(1))*(x(2)-x(1)));
26 e = -1/J * (mu+lambda)*(x(3)-x(1))*(y(3)-y(1));
27 f = 1/J * (mu*(x(2)-x(1))^2 + (2*mu+lambda)*(y(2)-y(1))^2);
28 g = 1/J * (mu*(y(3)-y(1))^2 + (2*mu+lambda)*(x(3)-x(1))^2);
29 h = 1/J * (mu*(x(2)-x(1))*(y(3)-y(1)) +
30     lambda*(x(3)-x(1))*(y(2)-y(1)));
31 i = -1/J * (mu+lambda)*(x(2)-x(1))*(y(2)-y(1));
32 j = 1/J * (mu*(y(2)-y(1))^2 + (2*mu+lambda)*(x(2)-x(1))^2);
33
34 switch lower(option)
35     case {'linear'}
36         % local stiffness matrix for linear shape functions:
37         S = 1/2 * [ a+2*b+f, d+e+h+i, -a-b, -e-h, -b-f, -d-i;
38                     d+e+h+i, 2*c+g+j, -d-e, -c-g, -h-i, -c-j;
39                     -a-b, -d-e, a, e, b, d;
40                     -e-h, -c-g, e, g, h, c;
41                     -b-f, -h-i, b, h, f, i;
42                     -d-i, -c-j, d, c, i, j ];
43
44     case {'bubble'}
45         % local stiffness matrix for quadratic shape functions:
46         S = 4/3* diag([a+b+f, c+g+j, a+b+f, c+g+j, a+b+f, c+g+j]);
47
48         % gradient of u_S:
49         gradu_S_x = gradu(points, uS_local_x);
50         gradu_S_y = gradu(points, uS_local_y);
51         % transformation onto the reference element:

```

D. Quellcode

```

42 gradu_S_x = [x(2)-x(1), y(2)-y(1); x(3)-x(1),
43           y(3)-y(1)]*gradu_S_x';
44 gradu_S_y = [x(2)-x(1), y(2)-y(1); x(3)-x(1),
45           y(3)-y(1)]*gradu_S_y';
46 gradu_S = [gradu_S_x; gradu_S_y];
47 % f_local:
48 f_local = -(([a, b, e, d]*gradu_S).*[0; 0; 2/3; 0; -2/3; 0] +
49             ([b, f, h, i]*gradu_S).*[-2/3; 0; 2/3; 0; 0; 0]...
50             +([e, h, g, c]*gradu_S).*[0; 0; 0; 2/3; 0; -2/3] + ([d, i, c,
51                           j]*gradu_S).*[0; -2/3; 0; 2/3; 0; 0]);
52
53 otherwise
54     error('Unknown option');
55 end
56
57 end

```

Code D.24: Berechnung der lokalen Steifigkeitsmatrix für das Kontaktproblem

```

1 function j_E = normal_flux(E_p,given_flag, nodes, triangles, edges,
2                             edge_triangles, uS_values, lambda,mu)
%NORMALFLUX computes the stress normal flux for all given edges E in
E_p. The other given objects are: The nodes of the triangulation,
the indices of the triangles-nodes ordering, the
midpoints/edges-matrix edges, the edges-triangle-ordering
edge_triangle and the functionvalues of the Galerkin solution
uS_values. Also given are the Lame-constants.
3
4 % Initializing:
5 j_E = zeros(2, size(E_p,2));
6
7 % Evaluate the neighbours of all edges in the edges-set E_p:
8 [neighbours, flag] = neighbourhood(E_p, edge_triangles, 'edges');
9
10 % Computation of the single normal fluxes:
11 for k = 1:length(E_p)
12     % Evaluation of the edge-points:
13     edge_poi_ind = edges(3:4,E_p(k));
14     edge_poi = nodes(:,edge_poi_ind);
15
16     % Calculation of the gradient of u_S on T_1 and T_2:
17     neigh_tri_ind = neighbours(:,k);
18     neigh_tri = triangles(1:3,neigh_tri_ind);
19     p_T = nodes(:,neigh_tri);
20     p_T1 = p_T(:,1:3);
21     p_T2 = p_T(:,4:6);
22
23         % The calculated u_S values onto T_1 and T_2, where the first
            three rows are x-coordinates and the last three the
            y-coordinates:
24     uS_T1 = uS_values([2*neigh_tri(:,1)-1,2*neigh_tri(:,1)]);
25
26     if flag(k) == 0
27         uS_T2 = zeros(6,1);
28     else
29         uS_T2 = uS_values([2*neigh_tri(:,2)-1,2*neigh_tri(:,2)]);
30     end
31
32     graduS_T_x = [gradu(p_T1,uS_T1(1:3));gradu(p_T2,uS_T2(1:3))];
33     graduS_T_y = [gradu(p_T1,uS_T1(4:6));gradu(p_T2,uS_T2(4:6))];

```

D. Quellcode

```

34
35 % the normalvector from T_1 to T_2:
36 connect = edge_poi(:,2)-edge_poi(:,1);
37 orth_connect = [-connect(2);connect(1)];
38 n = 1/norm(orth_connect)*orth_connect;
39
40 % Verification, if n shows from T_1 to T_2:
41 p3_T1 = setdiff(p_T1',edge_poi','rows');
42 edge_test = (p3_T1-edge_poi(:,1))';
43
44 if edge_test*n > 0
45     n = -n;
46 end
47
48 strain1 = [graduS_T_x(1,1), 1/2*(graduS_T_x(1,2)+graduS_T_y(1,1));
49             1/2*(graduS_T_x(1,2)+graduS_T_y(1,1)), graduS_T_y(1,2)];
50 strain2 = [graduS_T_x(2,1), 1/2*(graduS_T_x(2,2)+graduS_T_y(2,1));
51             1/2*(graduS_T_x(2,2)+graduS_T_y(2,1)), graduS_T_y(2,2)];
52
53 if (given_flag(k) > 0)
54     stress1 = 2*mu(1)*strain1 + lambda(1)*trace(strain1)*eye(2);
55     stress2 = 2*mu(1)*strain2 + lambda(1)*trace(strain2)*eye(2);
56 else
57     stress1 = 2*mu(2)*strain1 + lambda(2)*trace(strain1)*eye(2);
58     stress2 = 2*mu(2)*strain2 + lambda(2)*trace(strain2)*eye(2);
59 end
60 j_E(:,k) = stress2*n - stress1*n;
61 end
62
63 end
64

```

Code D.25: Bestimmung des Normalenspannungsflusses über eine Kante E

```

1 function [wi,gauss,J,ansatz_values] =
2 quad_edge(points,ansatz_fun,num_of_nodes)
%QUAD_EDGE computes the weights, Gauss-points and functionvalues of
the shape functions, which are needed for the quadrature over an
edge of a triangle. The matrix points stores the x-,y-values of
the nodes of the edge, ansatz_fun a vector of shape functions and
num_of_nodes the number of nodes for the quadrature formula.
3
4 % x- and y-values of the points:
5 x = points(1,:);
6 y = points(2,:);
7
8 switch num_of_nodes
% determination of the weights and the local points xi,eta:
9 case 1
10     wi = 2;
11     local_poi = 0;
12
13 case 2
14     wi = [1,1];
15     local_poi = [-sqrt(1/3),sqrt(1/3)];
16
17 case 3
18     wi = [5/9,8/9,5/9];
19     local_poi = [-sqrt(3/5),0,sqrt(3/5)];
20
21 case 4
22     wi = [18-sqrt(30),18+sqrt(30),18+sqrt(30),18-sqrt(30)]/36;
23

```

D. Quellcode

```

24     local_poi =
25         [-sqrt(3/7+2/7*sqrt(6/5)), -sqrt(3/7-2/7*sqrt(6/5)),
26          sqrt(3/7-2/7*sqrt(6/5)), sqrt(3/7+2/7*sqrt(6/5))];
27
28     case 5
29         wi = [(322-13*sqrt(70))/900, (322+13*sqrt(70))/900, 128/225,
30                (322+13*sqrt(70))/900, (322-13*sqrt(70))/900];
31         local_poi =
32             [-1/3*sqrt(5+2*sqrt(10/7)), -1/3*sqrt(5-2*sqrt(10/7)),
33              0, 1/3*sqrt(5-2*sqrt(10/7)), 1/3*sqrt(5+2*sqrt(10/7))];
34
35     otherwise
36         error('keine Quadraturformel bekannt');
37
38 end
39
40 % evaluation of the Gauss-points by using xi and eta with the points
41 % and y:
42 l = sqrt((x(2)-x(1))^2+(y(2)-y(1))^2);
43 parameter = 1/2.*local_poi+l/2;
44 gauss(1,:) = x(1) + parameter.* (x(2)-x(1));
45 gauss(2,:) = y(1) + parameter.* (y(2)-y(1));
46
47 % evaluating the jacobian:
48 J = 1/2;
49
50 % computing the functionvalues of the shape functions in the local
51 % coordinates:
52 ansatz_values = ansatz_fun(local_poi);
53
54 end

```

Code D.26: Gewichte und Stützstellen für die Quadratur über eine Kante

```

1 function [u_S, points, edges, triangles, rhoS_plot, IQ_plot,
2 J_error, recursion_depth, degree_of_freedom, time_vec] =
3     adaptive_refinement_solution
4     (points, edges, triangles, lambda, mu, solution, vol_load_fun_x,
5      vol_load_fun_y, surf_load_fun_x, surf_load_fun_y, node_load, obstacle,
6      geo_data, J_exact, max_error, para_rho, max_points, max_recursion)
7 %ADAPTIVE_REFINEMENT SOLUTION uses the adaptive refinement strategy
8 % shown in chapter 4 and evaluates the solution on a adaptive
9 % refined mesh.
10
11 % initializing all local values:
12 u_S = solution;
13 J_u = J_exact;
14 rhoS_plot = zeros(max_recursion,1);
15 IQ_plot = zeros(max_recursion,1);
16 J_error = zeros(max_recursion,1);
17 recursion_depth = 1;
18 time_vec = zeros(max_recursion,1);
19 degree_of_freedom = zeros(max_recursion,1);
20
21 while 1
22     tic
23     % further initializations:
24     np = size(points,2);
25     degree_of_freedom(recursion_depth) = np;
26
27     % evaluate the boundary indices and conditions:
28     [~,~,H,~]=assemb(geo_data.mygeomb, points, edges);

```

D. Quellcode

```

22 [~,boundary_ind] = find(H(:,1:np));
23 [gamma_D,gamma_N,gamma_C] =
24     boundary_disjunction(boundary_ind,points);
25 num_of_dirichlet_points = length(gamma_D);
26 adjacency_D = sparse(2*num_of_dirichlet_points,2*np);
27 for i = 1:num_of_dirichlet_points
28     adjacency_D(2*i-1:2*i,2*gamma_D(i)-1:2*gamma_D(i)) = eye(2);
29 end
30 dirichlet_bound = sparse(2*(num_of_dirichlet_points),1);
31
32 num_of_contact_points = length(gamma_C);
33 B = zeros(num_of_contact_points,2*np);
34 % for simplicity just n = (0,1):
35 for j = 1:num_of_contact_points
36     if points(2,gamma_C(j))>0
37         B(j,2*gamma_C(j)-1:2*gamma_C(j)) = [0,-1];
38     else
39         B(j,2*gamma_C(j)-1:2*gamma_C(j)) = [0,1];
40     end
41 end
42
43 % assembling of the matrix/vector data and the evaluation of the
44 % Dirichlet boundary data:
45 [A,f] = assemble(points,edges,triangles,vol_load_fun_x,
46                   vol_load_fun_y,surf_load_fun_x,surf_load_fun_y,node_load,
47                   gamma_N,lambda,mu,7,'linear');
48
49 % evaluation of the midpoints:
50 [midpoints,midtri] = midpoints_of_triangle(triangles,points);
51 nmp = size(midpoints,2);
52
53 % computation of the functionvalues of the obstacle onto the mesh
54 % nodes and midpoints:
55 z_obs_prob = obstacle(points(1,gamma_C),points(2,gamma_C));
56
57 contact_midpoints = zeros(5,num_of_contact_points-1);
58 contact_count = 1;
59 for k = 1:nmp
60     if (ismember(midpoints(3,k),gamma_C) &&
61         ismember(midpoints(4,k),gamma_C))
62         contact_midpoints(1:4,contact_count) = midpoints(:,k);
63         contact_midpoints(5,contact_count) = k;
64         contact_count = contact_count+1;
65     end
66 end
67 z_obs_midpoints =
68     obstacle(contact_midpoints(1,:),contact_midpoints(2,:));
69
70 if size(z_obs_prob,1) == 1
71     z_obs_prob = z_obs_prob';
72     z_obs_midpoints = z_obs_midpoints';
73 end
74
75 % solution of the variational inequality with
76 % active-set/inner-points-method:
77 u_S = sparse(u_S);
78 z_obs_prob = sparse(z_obs_prob);
79 opts = optimset('Algorithm','interior-point-convex','LargeScale',
80                 'on','Display','off');
81 [u_S,J_uS] =
82     quadprog(A,-f,B,z_obs_prob,adjacency_D,dirichlet_bound,

```

D. Quellcode

```
74      [] ,[] ,u-S ,opts ) ;  
75  
76      my-uS = zeros(2*np,1) ;  
77      for i = 1:np  
78          my-uS(2*i-1) = 0;  
79          my-uS(2*i) = u-S(2*i);  
80      end  
81  
82      % plot of the deformed cylinder:  
83      point-shift = zeros(2,np);  
84      point-shift(1:2*np) = u-S;  
85      new-points = points+point-shift;  
86      figure(recursion_depth+1)  
87      pdeplot(new-points ,edges ,triangles )  
88  
89      % computing the functionvalues of u-S onto the midpoints:  
90      u-S-mid = zeros(num_of_contact_points-1,1);  
91  
92      for j = 1 : num_of_contact_points-1  
93          index = contact_midpoints([3,4],j);  
94  
95          if contact_midpoints(2,j)>0  
96              u-S-mid(j) = [(u-S(2*index(1)-1)+u-S(2*index(2)-1))/2,  
97                              (u-S(2*index(1))+u-S(2*index(2)))/2]*[0; -1/2];  
98          else  
99              u-S-mid(j) = [(u-S(2*index(1)-1)+u-S(2*index(2)-1))/2,  
100                         (u-S(2*index(1))+u-S(2*index(2)))/2]*[0; 1/2];  
101          end  
102      end  
103  
104      % the solution of the local defect problem by assembling the  
105      % matrix with the bubble functions and using the equations in  
106      % (4.10) and (4.11):  
107      [A-Q,rhoS-phiE] =  
108          assemble(points ,edges ,triangles ,vol_load_fun_x ,vol_load_fun_y ,  
109          surf_load_fun_x ,surf_load_fun_y ,node_load ,gamma_N ,lambda ,mu ,7 ,  
110          'bubble ',u-S);  
111  
112      % the contact condition for the solution auf the local defect  
113      % problem:  
114      B-Q = zeros(num_of_contact_points-1,2*nmp);  
115      % for simplicity just n = (0,1):  
116      for j = 1:num_of_contact_points-1  
117          if contact_midpoints(2,j)>0  
118              B-Q(j ,2*contact_midpoints(5,j)-1:2*contact_midpoints(5,j))  
119                  = [0,-1/2];  
120          else  
121              B-Q(j ,2*contact_midpoints(5,j)-1:2*contact_midpoints(5,j))  
122                  = [0,1/2];  
123          end  
124      end  
125      [eps_V,~] = quadprog(A-Q,-rhoS-phiE,B-Q,z_obs_midpoints+u-S-mid ,  
126      [],[],[],[],[],opts );  
127  
128      % the hierarchical error estimator: evaluation of rho_S(eps_V)  
129      % with the equation beyond (4.68):  
130      rhoS_glob = eps_V'*rhoS-phiE  
131      rhoS-plot(recursion_depth) = rhoS_glob;  
132  
133      % computation of -I_Q(eps_V) with (4.6):  
134      IQ-plot(recursion_depth) = -1/2*(eps_V.^2)*diag(A-Q) + rhoS_glob ;  
135  
136
```

D. Quellcode

```

123 % calculation of the error of -I(e):
124 J_error(recursion_depth) = J_uS - J_u;
125
126 % evaluating the local contributions of rho_S with Lemma 4.14:
127 rho_p = eval_rho_p(points, triangles, edges, midpoints, midtri, u_S,
128     eps_V, vol_load_fun_x,
129     vol_load_fun_y, surf_load_fun_x, surf_load_fun_y,
130     node_load, gamma_N, lambda, mu);
131 sum(rho_p)
132 % calculating the indices of the triangles, which have to be
133 % refined:
134 refine_triangle = find_triangle_refinement(rho_p, rhoS_glob,
135     triangles, para_rho, 'symmetric');
136
137 % refinement of the mesh:
138 [p_h, e_h, t_h, uS_h] = refinemesh(geo_data.mygeomg, points, edges,
139     triangles, u_S, refine_triangle);
140
141 % termination criterion: if the number of the nodes is too large,
142 % no triangle will be refined or the hierarchical error
143 % estimator is small enough:
144 if isempty(refine_triangle) || rhoS_glob < max_error ||
145     recursion_depth == max_recursion || length(p_h) > max_points)
146     u_S = point_shift;
147     fprintf('%s %f.\n', 'Die Rekursionsstufe ist ',
148         recursion_depth);
149     break;
150 else
151     points = p_h;
152     edges = e_h;
153     triangles = t_h;
154     u_S = uS_h;
155     recursion_depth = recursion_depth + 1;
156 end
157 time_vec(recursion_depth) = toc;
158
159 % elimination of the zeros in the vectors of the error/-estimator:
160 rhoS_plot = rhoS_plot(1:recursion_depth);
161 IQ_plot = IQ_plot(1:recursion_depth);
162 J_error = J_error(1:recursion_depth);
163 degree_of_freedom = degree_of_freedom(1:recursion_depth);
164 time_vec = time_vec(1:recursion_depth);
165 end

```

Code D.27: Adaptive Verfeinerung des Gitters und Lösung des Kontaktproblems

```

1 function [J_error, rhoS_plot, IQ_plot, degree_of_freedom, time] =
2     start_example4
3
4 clear
5 clear all
6 clc
7
8 % loading of the geometry data (non-constant boundary):
9 data = load('mycylinder.mat');
10 % loadfunction f (here contant):
11     function z = zero_load(x,y)
12         z = zeros(size(x));
13     end

```

D. Quellcode

```

13 % possible function for a volume load:
14 function z = y_vol_load(x,y)
15     z = zeros(size(x));
16     index = find(y > 0);
17     z(index) = -100*1/2*(1-y(index));
18 end
19
20 % function for the surface load:
21 function z = y_surf_load(x,y)
22     z = zeros(size(y));
23
24     index = find(x>- 0.26 & x<0.26 & abs(x.^2+(y- 1).^2 -
25                 1)<=0.001);
26     z(index) = -100*ones(size(index));
27 end
28
29 % function for the pointwise node load:
30 function z = node_load(x,y)
31     z = zeros(size(y));
32
33     index = find(x>- 0.156434465040232 & x<0.156434465040231);
34     z(index) = -100*ones(size(index))./length(index);
35 end
36
37 vol_load_x = @(x,y) zero_load(x,y);
38 vol_load_y = @(x,y) zero_load(x,y);
39 surf_load_x = @(x,y) zero_load(x,y);
40 surf_load_y = @(x,y) zero_load(x,y);
41 point_load = @(x,y) node_load(x,y);
42 % loading the exakt data for the given problem:
43 J_u = - 2.29;
44 % obstacle function:
45 function z = my_obs(x,y)
46     z = 1-sqrt(1-x.^2);
47 end
48 my_obstacle = @(x,y) my_obs(x,y);
49
50 % mechanical values:
51 E = [7000,10^6];
52 nu = [0.3,0.45];
53 lambda = nu.*E./((1+nu).*(1-2*nu));
54 mu = E./(2.*(1+nu));
55
56 % initializing the mesh:
57 h = 0.17;
58 [p,e,t] = initmesh(data.mygeomg,'Hmax',h,'MesherVersion','R2013a');
59
60 % plot of the mesh with the nodes and midpoints/edges:
61 figure(1);
62 pdemesh(p,e,t);
63
64 % initialization of the global values:
65 u_S = [];
66 itermax = 1;           % maximum iteration depth
67 nmax = 30000;          % maximum number of nodes
68 eps = 0.0001;          % upper bound for the hierarchical error
                           estimate
69 theta_rho = 0.35;      % contraction parameter for local
                           contributions of the error estimate
70
71 tic

```

D. Quellcode

```
72 % adaptive algorithm:  
73 [u_S,p,e,t,rhoS_plot,IQ_plot,J_error,recursion_depth,  
    degree_of_freedom,time] =  
    adaptive_refinement_solution(p,e,t,lambda,mu,u_S,vol_load_x,  
    vol_load_y,surf_load_x,surf_load_y,point_load,my_obstacle,  
    data,J_u,eps,theta_rho,nmax,itermax);  
74 toc  
75  
76 % plot of the error and the error estimator:  
77 figure(recursion_depth+2)  
78 plot(1:recursion_depth,J_error,'--o',...  
    1:recursion_depth,IQ_plot,'-*',1:recursion_depth,rhoS_plot,'-.x');  
79 ymin = min([min(J_error),min(IQ_plot),min(rhoS_plot)]) - 0.5;  
80 ymax = max([max(J_error),max(IQ_plot),max(rhoS_plot)]) + 0.5;  
81 axis([0.5,recursion_depth+0.5,ymin,ymax]);  
82 legend('functional error','estimated error','error  
    indicator','location',...
    'best');  
83  
84 % plot of the solution:  
85 figure(recursion_depth+3);  
86 pdeplot(p,e,t,'xydata',u_S(1,:), 'zdata',u_S,'mesh','off','colormap',
    'jet','colorbar','on');  
87 title('solution (in x-direction) of the obstacle  
    problem','FontSize',15)  
88  
89 figure(recursion_depth+4);  
90 pdeplot(p,e,t,'xydata',u_S(2,:), 'zdata',u_S,'mesh','off','colormap',
    'jet','colorbar','on');  
91 title('solution (in y-direction) of the obstacle  
    problem','FontSize',15)  
92  
93  
94 end
```

Code D.28: Startdatei des Beispiels 6.4 für das Kontaktproblem

Index

- (quasi-) uniforme Zerlegung, 28
- Poincaré-Friedrich-Ungleichung
 - verallgemeinerte, 90
- 1. Green'sche Formel, 18, 154
- a posteriori Fehlerschätzer, 36
- Active-Set-Algorithmus, 68, 116
- adaptive Verfeinerungsstrategie, 11
- aktuelle Konfiguration, 39
- Approximationssatz, 16
- Approximationssatz für Interpolationen, 35
- Assemblierung, 33, 112, 115
- Ausgangskonfiguration, 39, 58, 60
- Betrachtungsweise
 - Euler'sche, 40
 - Lagrange'sche, 40
 - materielle, 40
 - räumliche, 40
- Bilinearform
 - elliptisch, 19
 - koerziv, 19
 - stetig, 19
- Bubble-Funktion, 73, 108
- Cauchy-Folge, 15
- Cauchy-Green-Tensor
 - rechter, 41
- Cauchy-Schwarz'sche Ungleichung, 88
- Cauchy-Schwarz'sche Ungleichung, 15
 - 23
- Cauchy-Spannungstensor, 42
- Cauchy-Theorem, 61
- Coulomb-Reibung, 62
- Courant-Element, 31
- Defektproblem, 37, 72
 - lokales, 75
- Deformationsgradient, 40
 - materiell, 41
 - räumlich, 41
- Dirichlet-Problem, 17, 18
 - homogenes, 18, 19, 47
- Dirichtlet-Problem, 85
- Divergenz, 153
- Dualraum, 151
- dyadisches Produkt, 151
- ebener Verzerrungszustand, 43
- Einheitstensor, 152
- Einstein'sche Summenkonvention, 64, 152
- Elastizitätsmodul, 43
- Energie-Norm, 33, 34
- Fehlerindikator, 78, 79, 89
- Finite-Elemente-Methode, 11, 30, 67
- Fixpunktsatz von Brouwer, 51
- Funktionaldeterminante, 112
- Gâteaux-Ableitung, 41, 142
 - rechtsseitig, 142
- Gâteaux-differenzierbar, 66, 73, 142, 143
- Galerkin-Approximation, 12, 26, 34, 36
- Galerkin-Lösung, 119
- Galerkin-Orthogonalität, 34, 80, 81
- Galerkin-Verfahren, 11, 26, 27, 30
- Gap-Funktion, 13, 60, 119, 123, 136
- global-local node ordering, 33
- Gradient, 153

- hängender Knoten, 29
Hertz'sche Kontaktproblem, 119
Hertz'sches Kontaktproblem, 134
Hilbertraum, 15
Hindernisproblem, 58
homogenes Dirichlet-Problem, 19
Hooke'sche Gesetz, 134
Hooke'sche-Gesetz, 62
Hooke'sches Materialmodell, 43

Innere-Punkte-Methode, 116
Integralsatz
 Gauß, 153
 Green, 154
isolierte Kontaktknoten, 82, 117
isoparametrisches Element, 18

Kettenregel, 112
Komplementaritätsbedingung, 61
Konfiguration, 39
 aktuelle, 39
 Ausgangs-, 39
 Momentan-, 39
 Referenz-, 39
Kontaktknoten, 81, 110
Kontaktproblem, 58, 108
Kontaktrand, 61
Kontinuum, 39
Korn'sche Ungleichung, 65
kritische Richtung, 59
kritischer Punkt, 60
Kroneckerdelta, 152

Lagrange-Basis, 30
Lamé-Konstanten, 43, 119, 122, 134
Lax-Milgram, 21, 23, 24, 45
Lebesgue-Raum, 140
lineares Komplementaritätsproblem,
 52
lokale Steifigkeitsmatrix, 32

Master, 59
materielle Punkte, 39
Matlab
 refinemesh, 38

Momentankonfiguration, 39, 60
Neumann-Rand, 61, 122
Nichtdurchdringungsbedingung, 60
Nichtkontaktknoten, 81, 110
nodale Basis, 30
nodale Basisfunktion, 30
Normalenspannungsfluß, 122

orthogonales Komplement, 17
Oszillation, 82
Oszillationsterme, 82, 84, 98, 99, 103,
 104, 118, 119

Penalty-Methode, 69
Poincaré-Friedrich-Ungleichung, 23, 90,
 91, 93, 95, 96
Polarkoordinaten, 124
Produktregel, 153
Projektionen, 16

quadratisches Programm, 53, 116
Quadratur
 7-Punkte-Formel, 115
 Gauß, 115, 116, 118
 Seitenmittens-Regel, 115

räumliche Punkte, 39
Randbedingungen
 Dirichlet, 58, 63, 124
 Kontakt, 58
 Neumann, 58, 61
Raum der Testfunktionen, 140
Referenzkonfiguration, 39
reflexiver Raum, 144
Reibungsfunktional, 66
Riesz'scher Darstellungssatz, 24

Saturationseigenschaft, 36, 104
Satz von Gauß, 42, 63
Schubmodul, 43
schwache Ableitung, 140
schwache Lösung, 19
Signorini-Kontakt, 13, 58, 61–63
Skalarprodukt, 152

Index

- doppelt verjüngend, 152
- einfach verjüngend, 152
- Slave, 59
- Sobolev-Raum, 15, 140
- Spannung, 58, 61
- Spannungsrand, 58
- Spline-Interpolation, 57
- Spursatz, 88, 142
- starkes Problem, 19
- Steifigkeitsmatrix, 27
- Tensor, 151
- Tensorprodukt, 151, 152
- Tresca-Reibung, 62, 66
- Triangulierung, 28
 - konform, 28, 37
 - quasi-uniform, 28, 35
 - uniform, 29
 - zulässig, 28
- Ungleichungen
 - Poincaré, 90
- Variationsgleichung, 18
- Verfeinerung
 - blau, 38
 - grün, 38
 - regulär, 38
 - rot, 38
- Verschiebung, 41
- Verschiebungsgradient
 - materiell, 41
 - räumlich, 41
- Verschiebungsrand, 58
- Verzerrung, 58
- Verzerrungstensor
 - Green-Lagrange, 41, 42
- virtuelle Verschiebung, 63
- Voigt-Notation, 43

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, Cornelius Rüther, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe. Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen oder aus anderweitigen fremden Äußerungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Ferner erkläre ich, dass die Arbeit noch nicht in einem anderen Studiengang als Prüfungsleistung verwendet wurde.

Hannover, den 10. Dezember 2014

Unterschrift