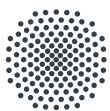


Elliptische Randwertprobleme mit gewichteter Kernkollokation

Bachelorarbeit



Universität Stuttgart



August 2018

Bachelorarbeit

Elliptische Randwertprobleme mit gewichteter Kernkollokation

Der Fakultät Mathematik und Physik der Universität Stuttgart zur Erlangung der
Würde eines Bachelor of Science Mathematik (B.Sc.) vorgelegte Abhandlung

von

Daniel Koch

aus Leonberg

Prüfer:	Prof. Dr. Bernard Haasdonk
Betreuer:	Prof. Dr. Bernard Haasdonk
Immatrikulationsnummer:	2948791
Eingereicht am:	3. August 2018

Institut für Angewandte Analysis und Numerische Simulation der Universität Stuttgart.

IANs

August 2018

Bachelor's Thesis

Elliptic Boundary Value Problems with Weighted Kernel Collocation

A Bachelor's Thesis presented to the faculty Mathematik und Physik, University of
Stuttgart,
in partial fulfillment of the requirements for the degree of
Bachelor of Science Mathematik (B.Sc.).

by

Daniel Koch

from Leonberg

First Examiner:	Prof. Dr. Bernard Haasdonk
Second Examiner:	Prof. Dr. Bernard Haasdonk
Student ID:	2948791
Submitted on:	3rd August 2018

Institute for Applied ??? at University of Stuttgart.

IAN S

August 2018

Zusammenfassung

Stichwörter:

Abstract

Keywords:

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Abstract	iii
Abbildungsverzeichnis	vii
Tabellenverzeichnis	ix
1 Einleitung	1
2 Kernfunktionen und reproduzierende Kern Hilberträume	3
3 Standardkollokation	13
3.1 Symmetrische Kollokation	13
3.2 Nicht-Symmetrische Kollokation	15
4 Gewichtete Kollokation	17
4.1 Motivation für die gewichtete Kollokation	17
4.2 Gewichtsfunktionen	19
4.3 Symmetrische Kollokation	22
4.4 Nicht-Symmetrische Kollokation	24
5 Implementation	27
6 Numerische Tests	31
Literatur	33
Akronyme	35

Abbildungsverzeichnis

4.1	Plot eines Interpolanten über den Rand des Gebietes	18
5.1	Plots verschiedener Kerne	27

Tabellenverzeichnis

KAPITEL 1

Einleitung

Unser Ziel ist es Lösungen von partielle Differentialgleichungen (PDEs) zu approximieren. Diese sind allgemein gegeben durch:

$$Lu(x) = f(x), x \in \Omega$$

$$Bu(x) = g(x), x \in \partial\Omega$$

, wobei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$, L ein linearer, beschränkter Differentialoperator und B ein linearer, beschränkter Auswertungsoperator ist.

Kernfunktionen und reproduzierende Kern Hilberträume

Die Kernkollokation ist ein Verfahren, welches auf der Idee der Interpolation beruht. Diese ist zunächst aber nur für die Punktauswertung bekannt. Das genügt uns hier nicht mehr, da wir auch Ableitungen betrachten müssen und benötigen daher eine verallgemeinerte Form.

Definition 2.1. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ eine nicht leere Menge, \mathcal{H} ein Hilbertraum mit Funktionen $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$, $u \in \mathcal{H}$ und $\Lambda_N := \{\lambda_1, \dots, \lambda_N\} \subset \mathcal{H}'$ eine Menge von linearen, stetigen und linear unabhängigen Funktionalen. Dann ist eine Funktion $s_u \in \mathcal{H}$ ein Interpolant von u , wenn gilt, dass

$$\langle \lambda_i, u \rangle = \langle \lambda_i, s_u \rangle, 1 \leq i \leq N$$

, wobei wir $\langle \lambda_i, u \rangle := \lambda_i(u)$ für die Anwendung des Funktionalen schreiben.

Beispiel 2.2. ■ Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^d$, $X_N := \{x_1, \dots, x_N\} \subset \Omega$ eine Menge von Punkten und \mathcal{H} ein Hilbertraum mit Funktionen, in dem die Punktauswertungsfunktionale $\delta_{x_i}(f) = f(x_i)$, $1 \leq i \leq N$ stetig sind. Dann bekommen wir die Standardinterpolation mit $\Lambda_N := \{\delta_{x_1}, \dots, \delta_{x_N}\} \subset \mathcal{H}'$.

$$s(x_i) = \langle \delta_{x_i}, s \rangle = \langle \delta_{x_i}, s_u \rangle = s_u(x_i), 1 \leq i \leq N$$

- Mit $\lambda_i := \delta_{x_i} \circ D^a$ für einen Multiindex $a \in \mathbb{N}_0^d$ erhält man noch zusätzliche Informationen über die Ableitung der Funktion.
- Sei eine PDE gegeben:

$$Lu(x) = f(x), x \in \Omega$$

$$Bu(x) = g(x), x \in \partial\Omega$$

, wobei L ein linearer Differentialoperator und B ein linearer Auswertungsoperator ist. Sei $X_N \subset \Omega$ eine Menge an Kollokationspunkten. Dann möchten wir, dass s_u die PDE in den Punkten X_N erfüllt, also:

$$Ls_u(x_i) = Lu(x_i) = f(x_i), x_i \in \Omega$$

$$Bs_u(x_i) = Bu(x_i) = g(x_i), x_i \in \partial\Omega$$

Wir müssen einen geeigneten Ansatz wählen um das Interpolationsproblem zu lösen, also einen N -dimensionalen Unterraum $V_N := \text{span}\{\nu_1, \dots, \nu_N\} \subset \mathcal{H}$ und fordern, dass $s_u \in V_N$, also

$$s_u(x) := \sum_{j=1}^N \alpha_j \nu_j(x), x \in \Omega, \alpha \in \mathbb{R}^N$$

Also lassen sich die Interpolationsbedingungen schreiben als:

$$\langle \lambda_i, u \rangle = \langle \lambda_i, s_u \rangle = \sum_{j=1}^N \alpha_j \langle \lambda_i, \nu_j \rangle$$

Diese lassen sich auch als lineares Gleichungssystem $A_\Lambda \alpha = b$ schreiben mit $(A_\Lambda)_{i,j} := \langle \lambda_i, \nu_j \rangle, b_i := \langle \lambda_i, u \rangle$.

Wir suchen jetzt nach geeigneten Ansatzfunktionen und einem Hilbertraum, in dem die Auswertungs- und Differentialfunktionale stetig sind. Dies führt uns zur Definition von Kern Funktionen, mit denen wir einen Hilbertraum konstruieren werden, der uns das Geforderte liefern wird.

Definition 2.3. Sei Ω eine nicht leere Menge. Ein reeller Kern auf Ω ist eine symmetrische Funktion $K : \Omega \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$.

Für alle $N \in \mathbb{N}$ und für eine Menge $X_N = \{x_i\}_{i=1}^N$ ist die Kern Matrix (oder Gram'sche Matrix) $A := A_{K, X_N} \in \mathbb{R}^{N \times N}$ definiert als $A := [K(x_i, x_j)]_{i,j=1}^N$.

Ein Kern K heißt positiv definit (PD) auf Ω , wenn für alle $N \in \mathbb{N}$ und alle Mengen X_N mit paarweise verschiedenen Elementen $\{x_i\}_{i=1}^N$ gilt, dass die Kern Matrix positiv semidefinit ist. Der Kern K heißt strikt positiv definit (SPD), falls die Kern Matrix positiv definit ist.

Satz 2.4. *Sei Ω eine nicht leere Menge, $K_1, K_2 : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ zwei PD Kerne auf Ω und $a \geq 0$. Dann sind folgende Funktionen wieder PD Kerne auf Ω :*

1. $K(x, y) := K_1(x, y) + K_2(x, y)$
2. $K(x, y) := aK_1(x, y)$
3. $K(x, y) := K_1(x, y)K_2(x, y)$
4. $K(x, y) := \sum_{i=0}^{\infty} a_i K_1(x, y)^i, a_i \geq 0$ mit Konvergenzradius $\rho > 0$ und $\|K_1(x, y)\|_{\infty} \leq \rho$

Beweis. Die Symmetrie ist in allen Fällen offensichtlich. Wir betrachten daher nur die positive Definitheit.

Sei $X_N \subset \Omega$ eine Menge mit paarweise verschiedenen Punkten $\{x_i\}_{i=1}^N$.

1. Für die Kern Matrix von K gilt:

$$\begin{aligned}
 A_K &= \begin{pmatrix} K(x_1, x_1) & \cdots & K(x_1, x_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K(x_N, x_1) & \cdots & K(x_N, x_N) \end{pmatrix} \\
 &= \begin{pmatrix} K_1(x_1, x_1) & \cdots & K_1(x_1, x_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_1(x_N, x_1) & \cdots & K_1(x_N, x_N) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} K_2(x_1, x_1) & \cdots & K_2(x_1, x_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_2(x_N, x_1) & \cdots & K_2(x_N, x_N) \end{pmatrix} \\
 &= A_{K_1} + A_{K_2}
 \end{aligned}$$

Wir erhalten also für ein beliebiges $\alpha \neq 0$

$$\begin{aligned}\alpha^T A_K \alpha &= \alpha^T (A_{K_1} + A_{K_2}) \alpha \\ &= \underbrace{\alpha^T A_{K_1} \alpha}_{\geq 0} + \underbrace{\alpha^T A_{K_2} \alpha}_{\geq 0} \geq 0\end{aligned}$$

2. Für ein beliebiges $\alpha \neq 0$ gilt

$$\alpha^T A_K \alpha = \alpha^T a A_{K_1} \alpha = a \alpha^T A_{K_1} \alpha \geq 0$$

3. Wir betrachten wieder die Kernmatrix.

$$\begin{aligned}K &= \begin{pmatrix} K_1(x_1, x_1)K_2(x_1, x_1) & \cdots & K_1(x_1, x_N)K_2(x_1, x_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_1(x_N, x_1)K_2(x_N, x_1) & \cdots & K_1(x_N, x_N)K_2(x_N, x_N) \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} K_1(x_1, x_1) & \cdots & K_1(x_1, x_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_1(x_N, x_1) & \cdots & K_1(x_N, x_N) \end{pmatrix} \circ \begin{pmatrix} K_2(x_1, x_1) & \cdots & K_2(x_1, x_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ K_2(x_N, x_1) & \cdots & K_2(x_N, x_N) \end{pmatrix}\end{aligned}$$

, wobei \circ das punktweise Produkt der beiden Matrizen bezeichnet. Die beiden letzten Matrizen sind positiv semidefinit und damit nach dem Satz von Schur auch das Produkt der beiden.

4. Mit dem bisher gezeigten wissen wir, dass die endliche Summe $\sum_{i=0}^n a_i K_1(x, y)^i$ positiv definit ist. Sei A_n die dazugehörige Kern Matrix. Dann gilt für beliebiges $\alpha \neq 0$

$$\alpha^T A \alpha = \lim_{n \rightarrow \infty} \alpha^T A_n \alpha \geq 0$$

, da das Argument des Grenzwerts immer größer als Null ist und die Reihe für $\|K_1(x, y)\|_\infty \leq \rho$ konvergiert.

□

Beispiel 2.5. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$. Dann sind folgende Funktionen PD Kerne auf Ω :

-
- $K(x, y) := \gamma^{-1}(x, y), \gamma > 0$
 - $K(x, y) := \exp(-\gamma\|x - y\|^2), \gamma > 0$ ist sogar SPD

Beweis. ▪ Die Kern Matrix entspricht der Gram Matrix des Skalarprodukts. Diese ist aufgrund der positiven Definitheit des Skalarprodukt positiv definit.

- Einen Beweis dafür findet man in Wendland [1, Theorem 6.10].

□

Wir kommen mit der Definition von Kernen direkt zu den gesuchten Hilberträumen. Diese sind zunächst ohne Bezug zu Kernen definiert, wir werden aber feststellen, dass sie eng miteinander verknüpft sind.

Definition 2.6 (Reproduzierender Kern Hilbertraum). Sei Ω eine nicht leere Menge und \mathcal{H} ein Hilbertraum mit Funktionen $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ und Skalarprodukt $(\cdot, \cdot)_{\mathcal{H}}$. Dann nennt man \mathcal{H} Reproduzierender Kern Hilbert Raum (RKHR) auf Ω , wenn eine Funktion $K : \Omega \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ existiert, sodass

1. $K(\cdot, x) \in \mathcal{H}$ für alle $x \in \Omega$
2. $(f, K(\cdot, x))_{\mathcal{H}} = f(x)$ für alle $x \in \Omega, f \in \mathcal{H}$

Satz 2.7. Sei \mathcal{H} ein RKHR mit Funktion K . Dann ist K ein Kern, eindeutig und positiv definit.

Beweis. Wir zeigen zunächst, dass K tatsächlich ein Kern ist.

$$\begin{aligned}
 K(x, y) &= (K(\cdot, y), K(x, \cdot))_{\mathcal{H}} && \text{(Reproduzierbarkeit)} \\
 &= (K(x, \cdot), K(\cdot, y))_{\mathcal{H}} \\
 &= K(y, x) && \text{(Reproduzierbarkeit)}
 \end{aligned}$$

Sei $X_N \subset \Omega$ eine Menge von paarweise verschiedenen Punkten und $\alpha \in \mathbb{R}^N, \alpha \neq 0$. Dann gilt:

$$\begin{aligned} \alpha^T A \alpha &= \sum_{i,j=1}^N \alpha_i \alpha_j K(x_i, x_j) \\ &= \sum_{i,j=1}^N \alpha_i \alpha_j (K(\cdot, x_i), K(\cdot, x_j))_{\mathcal{H}} \\ &= \left(\sum_{i=1}^N \alpha_i K(\cdot, x_i), \sum_{j=1}^N \alpha_j K(\cdot, x_j) \right)_{\mathcal{H}} \\ &= \left\| \sum_{i=1}^N \alpha_i K(\cdot, x_i) \right\|_{\mathcal{H}}^2 \geq 0 \end{aligned}$$

K ist somit PD.

Seien jetzt K_1, K_2 zwei Kerne auf \mathcal{H} . Dann gilt für alle $x, y \in \Omega$:

$$\begin{aligned} K_1(x, y) &= (K_1(\cdot, y), K_2(x, \cdot))_{\mathcal{H}} && \text{(Reproduzierbarkeit von } K_1) \\ &= K_2(x, y) && \text{(Reproduzierbarkeit von } K_2) \end{aligned}$$

Also ist K eindeutig. □

Bei Interpolationsproblemen kommen wir jedoch aus der anderen Richtung und haben Ansatzfunktionen, also einen Kern K , gegeben und wollen damit eine Funktion approximieren. Also stellt sich die Frage ob zu jedem Kern K ein RKHR existiert. Diese wird durch folgenden Satz beantwortet:

Satz 2.8. *Sei Ω eine nicht leere Menge und $K : \Omega \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ ein positiv definiten Kern. Dann existiert genau ein RKHR $\mathcal{H}_K(\Omega)$ mit reproduzierendem Kern K .*

Beweis. Einen Beweis findet man in Wendland [1, Kap. 10.2].

Man betrachtet dort zunächst den $\text{span}\{K(\cdot, y), y \in \Omega\}$ und stellt fest, dass dieser mit einem geeigneten Innenprodukt ein Prähilbertraum ist. Der Abschluss dessen ist der gesuchte RKHR. □

Wir wollen an einen Satz aus der Funktionalanalysis erinnern, den wir oft brauchen werden.

Satz 2.9 (Fréchet-Riesz). *Sei \mathcal{H} ein Hilbertraum und $\lambda \in \mathcal{H}'$ ein beschränktes lineares Funktional. Dann existiert ein eindeutig bestimmtes Element $\nu_\lambda \in \mathcal{H}$, so dass für alle $x \in \mathcal{H}$ gilt:*

$$\langle \lambda, x \rangle = (x, \nu_\lambda)$$

Wir nennen ν_λ den Riesz-Repräsentanten von λ .

Zur Wohldefiniertheit unserer Interpolation benötigen wir die Stetigkeit aller benutzten Funktionale. Zunächst betrachten wir die Punktauswertungsfunktionale.

Satz 2.10. *Sei Ω eine nicht leere Menge und \mathcal{H} ein Hilbertraum mit Funktionen $f : \Omega \rightarrow \mathbb{R}$. Dann gilt:*

1. \mathcal{H} ist genau dann ein RKHR, wenn die Auswertungsfunktionale stetig sind.
2. Wenn \mathcal{H} ein RKHR mit Kern K ist, dann ist $K(\cdot, x)$ der Riesz-Repräsentant des Funktionals $\delta_x \in \mathcal{H}'$.

Beweis. 1. Sei \mathcal{H} ein RKHR. Für alle $f \in \mathcal{H}$ und alle $x \in \Omega$ gilt:

$$\begin{aligned} |\langle \delta_x, f \rangle| &= |f(x)| \\ &= |(f, K(\cdot, x))_{\mathcal{H}}| && \text{(Reproduzierbarkeit)} \\ &\leq \|f\|_{\mathcal{H}} \|K(\cdot, x)\|_{\mathcal{H}} && \text{(Cauchy Schwarz)} \\ &= \|f\|_{\mathcal{H}} \sqrt{(K(\cdot, x), K(\cdot, x))_{\mathcal{H}}} \\ &= \|f\|_{\mathcal{H}} \sqrt{K(x, x)} && \text{(Reproduzierbarkeit)} \\ \Leftrightarrow \frac{|\langle \delta_x, f \rangle|}{\|f\|_{\mathcal{H}}} &\leq \sqrt{K(x, x)} \end{aligned}$$

Also ist δ_x beschränkt und damit stetig.

Für die andere Richtung nehmen wir an, dass $\delta_x \in \mathcal{H}'$ für alle $x \in \Omega$. Also existiert ein Riesz-Repräsentant $\nu_{\delta_x} \in \mathcal{H}$. Definieren wir $K(\cdot, x) := \nu_{\delta_x}$, dann ist K ein Kern. Es ist klar, dass $K(\cdot, x) \in \mathcal{H}$ und nach der Definition des Riesz-Repräsentanten gilt:

$$(f, K(\cdot, x))_{\mathcal{H}} = (f, \nu_{\delta_x})_{\mathcal{H}} = \langle \delta_x, f \rangle = f(x)$$

2. Die Behauptung folgt sofort aus der Reproduzierbarkeit von K , da $(f, K(\cdot, x))_{\mathcal{H}} = f(x)$ für alle $x \in \Omega$ und alle $f \in \mathcal{H}$ gilt.

□

Wir haben also gesehen, dass in einem RKHR \mathcal{H}_K die Auswertungsfunktionale stetig sind. Da wir uns mit Differentialgleichungen beschäftigen, wollen wir auch Ableitungen auswerten. Dafür benötigen wir, dass diese ebenfalls in \mathcal{H}_K liegen.

Satz 2.11. *Sei $k \in \mathbb{N}$. Angenommen $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ ist offen, K ist SPD auf Ω und $K \in C^{2k}(\Omega \times \Omega)$. Dann gilt für alle Multiindizes $a \in \mathbb{N}_0^d$ mit $|a| \leq k$ und alle $x \in \Omega$, dass $D_2^a K(\cdot, x) \in \mathcal{H}_K(\Omega)$.*

Außerdem gilt für alle $f \in \mathcal{H}_K(\Omega)$:

$$D^a f(x) = (f, D_2^a K(\cdot, x))_{\mathcal{H}_K(\Omega)}$$

und damit dass $\lambda := \delta_x \circ D^a$ stetig ist.

Beweis. Einen Beweis des ersten Teils findet man in Wendland [1, Theorem 10.44] und einen Beweis des zweiten Teils in Santin [2, Proposition 3.14]. Der Beweis der Stetigkeit von $\lambda := \delta_x \circ D^a$ verläuft komplett analog zum Beweis von 2.10.1. □

In Satz 2.10 haben wir gesehen, wie der Riesz-Repräsentant des Auswertungsfunktionals aussieht. Dies wollen wir jetzt auf alle Funktionale verallgemeinern.

Satz 2.12. *Sei K ein PD Kern auf $\Omega \neq \emptyset$. Sei $\lambda \in \mathcal{H}_K(\Omega)'$. Dann ist $\lambda^y K(\cdot, y) \in \mathcal{H}_K(\Omega)$ und es gilt $\langle \lambda, f \rangle = (f, \lambda^y K(\cdot, y))_{\mathcal{H}_K(\Omega)}$ für alle $f \in \mathcal{H}_K(\Omega)$, wobei der hochgestellte Index bedeutet, dass das Funktional auf die zweite Komponente angewandt wird. Es ist also $\lambda^y K(\cdot, y)$ der Riesz-Repräsentant von λ .*

Beweis. Da $\lambda \in \mathcal{H}_K(\Omega)$, existiert ein Riesz-Repräsentant $\nu_\lambda \in \mathcal{H}_K(\Omega)$ mit $\langle \lambda, f \rangle = (f, \nu_\lambda)_{\mathcal{H}_K(\Omega)}$. Außerdem ist $f_x(y) := K(x, y)$ für alle $x \in \Omega$ eine Funktion in $\mathcal{H}_K(\Omega)$. Damit bekommen wir:

$$\begin{aligned}
\langle \lambda^y, K(x, y) \rangle &= \langle \lambda, f_x \rangle \\
&= (f_x, \nu_\lambda)_{\mathcal{H}_K(\Omega)} && \text{(Riesz-Repräsentant)} \\
&= (K(\cdot, x), \nu_\lambda)_{\mathcal{H}_K(\Omega)} \\
&= \nu_\lambda(x) && \text{(Reproduzierbarkeit)}
\end{aligned}$$

Damit gilt $\nu_\lambda(\cdot) = \lambda^y K(\cdot, y)$ und damit ist $\lambda^y K(\cdot, y)$ der Riesz-Repräsentant von ν_λ . Da $\nu_\lambda \in \mathcal{H}_K(\Omega)$ gilt auch $\lambda^y K(\cdot, y) \in \mathcal{H}_K(\Omega)$. \square

Jetzt fehlt nur noch die lineare Unabhängigkeit aller verwendeten Funktionale. Zunächst die der Auswertungsfunktionale:

Satz 2.13. *Sei Ω eine nicht leere Menge und \mathcal{H} ein RKHR mit Kern K . Dann sind $\{\delta_x, x \in \Omega\}$ genau dann linear unabhängig, wenn K SPD ist.*

Beweis. Seien $\lambda_1, \dots, \lambda_n \in \mathcal{H}'$ und $\nu_{\lambda_1}, \dots, \nu_{\lambda_n} \in \mathcal{H}$ die dazugehörigen Riesz Repräsentanten. Diese sind linear abhängig, wenn ein $\alpha \in \mathbb{R}^n$ existiert mit $\lambda := \sum_{i=1}^n \alpha_i \lambda_i = 0$, also dass $\langle \lambda, f \rangle = 0$ für alle $f \in \mathcal{H}$. Das gilt genau dann, wenn die Riesz Repräsentanten linear abhängig sind, da

$$0 = \langle \lambda, f \rangle = \sum_{i=1}^n \alpha_i \langle \lambda_i, f \rangle = \sum_{i=1}^n \alpha_i (\nu_{\lambda_i}, f)_{\mathcal{H}} = \left(\sum_{i=1}^n \alpha_i \nu_{\lambda_i}, f \right)_{\mathcal{H}}$$

Also gilt nach 2.10.2, dass $\{\delta_x, x \in \Omega\}$ genau dann linear unabhängig sind, wenn $\{K(\cdot, x), x \in \Omega\}$ linear unabhängig sind.

Um die strikte positive Definitheit nachzuweisen, betrachten wir die Matrix $A = [K(x_i, x_j)]_{i,j=1}^N$ für paarweise verschiedene Punkte $x_i, 1 \leq i \leq N$. Sei also $\beta \in \mathbb{R}^n, \beta \neq 0$. Dann gilt:

$$\begin{aligned} \beta^T A \beta &= \sum_{i,j=1}^n \beta_i \beta_j K(x_i, x_j) \\ &= \sum_{i,j=1}^n \beta_i \beta_j (K(\cdot, x_i), K(\cdot, x_j))_{\mathcal{H}} \\ &= \left(\sum_{i=1}^n \beta_i K(\cdot, x_i), \sum_{j=1}^n \beta_j K(\cdot, x_j) \right)_{\mathcal{H}} \\ &= \left\| \sum_{i=1}^n \beta_i K(\cdot, x_i) \right\|_{\mathcal{H}}^2 > 0 \end{aligned}$$

Für die letzte strikte Ungleichung benötigen wir die lineare Unabhängigkeit. Also gilt, dass K SPD ist, wenn $\{\delta_x, x \in \Omega\}$ linear unabhängig sind.

Die andere Richtung folgt genauso aus der letzten Ungleichung. \square

Und jetzt die der Auswertungen der Ableitungen:

Satz 2.14. *Sei K ein translationsinvarianter Kern auf \mathbb{R}^d , also $K(x, y) = \Phi(x - y)$ für alle $x, y \in \mathbb{R}^d$. Sei $k \in \mathbb{N}$ und angenommen, dass $\Phi \in L_1(\mathbb{R}^d) \cap C^{2k}(\mathbb{R}^d)$. Sei $a_1, \dots, a_N \in \mathbb{N}_0^d$ mit $|a_i| \leq k$ und sei $X_N \subset \mathbb{R}^d$. Angenommen, dass $a_i \neq a_j$, wenn $x_i = x_j$, dann sind die Funktionale $\Lambda_N := \{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}, \lambda_i := \delta_{x_i} \circ D^{a_i}$ linear unabhängig in $\mathcal{H}_K(\mathbb{R}^d)$.*

Beweis. Den Beweis findet man in Wendland [1, Theorem 16.4]. \square

Damit haben wir alle nötigen Werkzeuge um die Interpolation durchzuführen. Wir haben Ansatzfunktionen K , den dazugehörigen Hilbertraum $\mathcal{H}_K(\Omega)$, die Stetigkeit und lineare Unabhängigkeit aller benötigten Operatoren. Jetzt müssen wir nur noch einen geeigneten Ansatz wählen.

Standardkollokation

3.1 Symmetrische Kollokation

Sei wieder $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen und beschränkt, L, B lineare Differentialoperatoren, K ein positiv definiter Kern und folgendes Problem gegeben:

$$Lu(x) = f(x), x \in \Omega$$

$$Bu(x) = g(x), x \in \partial\Omega$$

Für ein $N \in \mathbb{N}$ betrachten wir die Menge $X_N \subset \Omega$, die wir in N_{in} Punkte im Inneren und N_{bd} Punkte auf dem Rand aufteilen. Also haben wir die beiden Mengen

$$X_{in} = X_N \cap \Omega$$

$$X_{bd} = X_N \cap \partial\Omega$$

Wir definieren die Menge $\Lambda_N = \{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}$ an linearen Funktionalen mit

$$\lambda_i = \begin{cases} \delta_{x_i} \circ L & x_i \in \Omega \\ \delta_{x_i} \circ B & x_i \in \partial\Omega \end{cases}$$

Wir wissen aus Satz 2.10, dass in $\mathcal{H}_K(\Omega)$ alle λ_i stetig und aus Satz 2.14, dass sie linear unabhängig sind. Als Ansatzfunktionen, also den Unterraum $V_N \subset \mathcal{H}_K(\Omega)$, wählen wir die Riesz Repräsentanten der λ_i :

$$\begin{aligned} V_N &= \text{span}\{\lambda_1^y K(x, y), \dots, \lambda_N^y K(x, y)\} \\ &= \text{span}\{(\delta_{x_1} \circ L)^y K(x, y), \dots, (\delta_{x_{N_{in}}} \circ L)^y K(x, y)\} \\ &\quad \cup \{(\delta_{x_{N_{in}+1}} \circ B)^y K(x, y), \dots, (\delta_{x_N} \circ B)^y K(x, y)\} \\ &=: \text{span}\{\nu_1, \dots, \nu_N\} \end{aligned}$$

Damit bekommen wir folgenden Interpolanten:

$$\begin{aligned} s_u(x) &= \sum_{j=1}^N \alpha_j \lambda_j^y K(x, y) \\ &= \sum_{j=1}^{N_{in}} \alpha_j (\delta_{x_j} \circ L)^y K(x, y) + \sum_{j=N_{in}+1}^N \alpha_j (\delta_{x_j} \circ B)^y K(x, y) \end{aligned}$$

Die α_j erhält man als Lösung des lineares Gleichungssystem (LGS) $A\alpha = b$ mit $A_{i,j} := \langle \nu_i, \nu_j \rangle_{\mathcal{H}_K}$, da

$$\langle \lambda_i, s_u \rangle = \langle \lambda_i, \sum_{j=1}^N \alpha_j \nu_j \rangle = \sum_{j=1}^N \alpha_j \langle \lambda_i, \nu_j \rangle \stackrel{2.12}{=} \sum_{j=1}^N \alpha_j \langle \nu_j, \nu_i \rangle$$

, also

$$\begin{pmatrix} A_{L,L} & A_{L,B} \\ A_{L,B}^T & A_{B,B} \end{pmatrix} \alpha = \begin{pmatrix} b_L \\ b_B \end{pmatrix}$$

mit

$$\begin{aligned} (A_{L,L})_{i,j} &= (\delta_{x_i} \circ L)^x (\delta_{x_j} \circ L)^y K(x, y), x_i, x_j \in X_{in} \\ (A_{L,B})_{i,j} &= (\delta_{x_i} \circ L)^x (\delta_{x_j} \circ B)^y K(x, y), x_i \in X_{in}, x_j \in X_{bd} \\ (A_{B,B})_{i,j} &= (\delta_{x_i} \circ B)^x (\delta_{x_j} \circ B)^y K(x, y), x_i, x_j \in X_{bd} \end{aligned}$$

und

$$(b_L)_i = f(x_i), x_i \in X_{in}$$

$$(b_B)_i = g(x_i), x_i \in X_{bd}$$

Das LGS ist lösbar, da A offensichtlich symmetrisch und positiv definit ist, da:

$$\alpha^T A \alpha = \sum_{i,j=1}^N \alpha_i \alpha_j (\nu_i, \nu_j)_{\mathcal{H}_K} = \left(\sum_{i=1}^N \alpha_i \nu_i, \sum_{j=1}^N \alpha_j \nu_j \right)_{\mathcal{H}_K} = \left\| \sum_{i=1}^N \alpha_i \nu_i \right\|_{\mathcal{H}_K}^2 > 0$$

Für die letzte Abschätzung benutzen wir die lineare Unabhängigkeit der Funktionale aus Satz 2.14.

3.2 Nicht-Symmetrische Kollokation

Sei die gleiche Problemstellung wie im vorherigen Kapitel gegeben. Wir wählen jedoch einen anderen Unterraum V_N für die Ansatzfunktionen:

$$V_N := \text{span}\{K(x, x_1), \dots, K(x, x_N)\}$$

Damit bekommen wir folgenden Interpolanten:

$$s_u(x) = \sum_{j=1}^N \alpha_j K(x, x_j)$$

Die α_i erhält man wieder als Lösung des LGS $A\alpha = b$ mit

$$A := \begin{pmatrix} A_L \\ A_B \end{pmatrix}$$

mit

$$(A_L)_{i,j} = (\delta_{x_i} \circ L)^x K(x, x_j), x_i \in X_{in}, x_j \in X_N$$

$$(A_B)_{i,j} = (\delta_{x_i} \circ B)^x K(x, x_j), x_i \in X_{bd}, x_j \in X_N$$

und b wie im vorherigen Abschnitt.

Bei diesem Ansatz kann jedoch nicht garantiert werden, dass die Matrix A invertierbar ist und damit, dass das LGS auch lösbar ist. Allerdings ist die Konstruktion eines Gegenbeispiels aufwendig und es ist in der Praxis unwahrscheinlich, dass man auf einen solchen Fall trifft. Man findet ein Beispiel in Hon u. a. [3].

Gewichtete Kollokation

4.1 Motivation für die gewichtete Kollokation

Die Standardkollokation hat, egal ob symmetrisch oder nicht-symmetrisch, das Problem, dass wir Punkte im Inneren und auf dem Rand unseres Definitionsbereichs benötigen. Dies macht zum einen die Implementierung etwas komplexer, da man dabei beide Mengen beachten muss, zum anderen werden die Werte auf dem Rand nicht zwingend genau angenommen. In Abbildung 4.1 ist die approximierte Lösung einer PDE mit Nullrandwerten über den Rand geplottet. Man erkennt deutlich, wo die Stützstellen der Ansatzfunktionen liegen und auch die Schwankungen zwischen den Stützstellen.

Wir stellen zur Vereinfachung zunächst fest, dass es genügt konstante Nullrandwerte in der PDE zu betrachten. Sei dafür wieder folgende PDE gegeben:

$$Lu(x) = f(x), x \in \Omega$$

$$Bu(x) = g(x), x \in \partial\Omega$$

Wir können annehmen, dass eine Funktion $\bar{g} \in C^2(\Omega)$ existiert mit $\bar{g}|_{\partial\Omega} = g$. Damit gilt $u = \bar{u} + \bar{g}$ für eine Funktion \bar{u} . Eingesetzt erhalten wir

$$L\bar{u}(x) + L\bar{g}(x) = f(x), x \in \Omega$$

$$B\bar{u} + B\bar{g} = g(x), x \in \partial\Omega$$

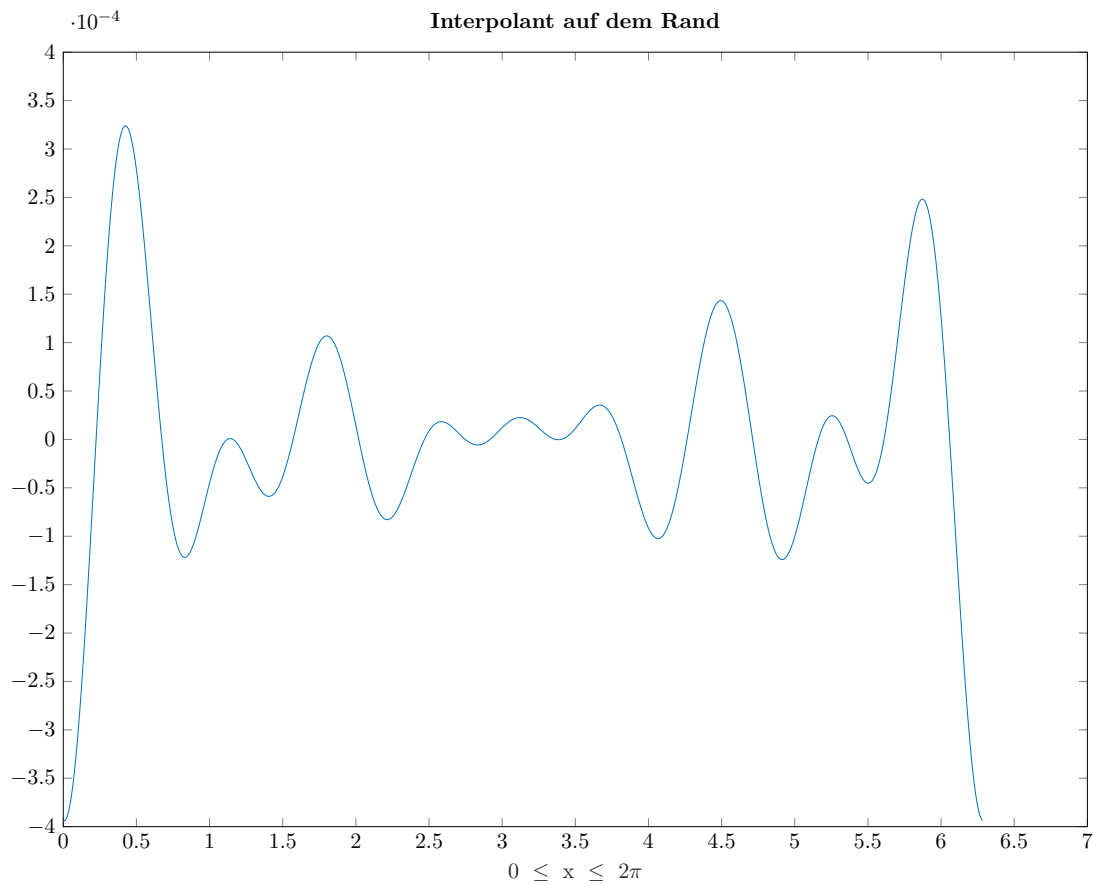


Abbildung 4.1: Plot eines Interpolanten über den Rand des Gebietes

, was äquivalent dazu ist, dass wir folgende PDE nach \bar{u} lösen:

$$L\bar{u}(x) = f(x) + L\bar{g}(x), x \in \Omega$$

$$\bar{u}(x) = 0, x \in \partial\Omega$$

Die Idee ist jetzt einen Kern bzw. Ansatzfunktionen zu konstruieren, der auf dem Rand von Ω Null ist. Der Interpolant ist eine Linearkombination aus diesen Funktionen und wird demnach auf dem Rand auch Null sein. Dafür führen wir Gewichtsfunktionen ein, die dann in Verbindung mit einem gegebenen Kern das Geforderte erfüllen werden.

4.2 Gewichtsfunktionen

Definition 4.1. Sei $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen und beschränkt. Eine Funktion $w : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ heißt Gewichtsfunktion auf Ω , wenn gilt:

1. $w(x) > 0$ für alle $x \in \Omega$
2. $w(x) = 0$ für alle $x \in \partial\Omega$
3. $w(x) < 0$ für alle $x \in \mathbb{R}^n \setminus \bar{\Omega}$

Satz 4.2. Seien $\Omega_1, \Omega_2 \subset \mathbb{R}^n$ zwei offene und beschränkte Mengen und w_1, w_2 die dazugehörigen Gewichtsfunktionen. Dann gilt:

1. Für das Komplement Ω^C : $w = -w_1$
2. Für die Vereinigung $\Omega_1 \cup \Omega_2$: $w = w_1 + w_2 + \sqrt{w_1^2 + w_2^2}$
3. Für den Schnitt $\Omega_1 \cap \Omega_2$: $w = w_1 + w_2 - \sqrt{w_1^2 + w_2^2}$

Beweis. 1. ▪ Sei $x \in \Omega^C$.

$$w(x) = -w_1(x) > 0$$

▪ Sei $x \in \partial\Omega^C$

$$w(x) = -w_1(x) = 0$$

▪ Sei $x \in \Omega$

$$w(x) = -w_1(x) < 0$$

2. ▪ Sei $x \in \Omega_1, x \in \Omega_2. \Rightarrow w_1 > 0, w_2 > 0$

$$w = w_1 + w_2 + \sqrt{w_1^2 + w_2^2} > 0$$

- Sei ohne Beschränkung der Allgemeinheit (oBdA) $x \in \Omega_1, x \notin \bar{\Omega}_2. \Rightarrow w_1 > 0, w_2 < 0$

$$w = w_1 + w_2 + \sqrt{w_1^2 + w_2^2} > w_1 + w_2 + \underbrace{\sqrt{w_2^2}}_{=|w_2|=-w_2} = w_1 + w_2 - w_2 = w_1 > 0$$

- Sei $x \notin \bar{\Omega}_1, x \notin \bar{\Omega}_2. \Rightarrow w_1 < 0, w_2 < 0$

$$\begin{aligned} w &= w_1 + w_2 + \sqrt{w_1^2 + w_2^2} \stackrel{!}{<} 0 \\ \Leftrightarrow -w_1 - w_2 &> \sqrt{w_1^2 + w_2^2} \\ \Leftrightarrow w_1^2 + \underbrace{2w_1w_2}_{>0} + w_2^2 &> w_1^2 + w_2^2 \end{aligned}$$

- Sei oBdA $x \in \partial\Omega_1, x \notin \bar{\Omega}_2. \Rightarrow w_1 = 0, w_2 \leq 0$

$$w = w_1 + w_2 + \sqrt{w_1^2 + w_2^2} = w_2 + \sqrt{w_2^2} = w_2 - w_2 = 0$$

- Sei oBdA $x \in \partial\Omega_1, x \in \bar{\Omega}_2. \Rightarrow w_1 = 0, w_2 > 0$

$$w = w_1 + w_2 + \sqrt{w_1^2 + w_2^2} = w_2 + \sqrt{w_2^2} > 0$$

3. ▪ Sei $x \in \Omega_1, x \in \bar{\Omega}_2. \Rightarrow w_1 > 0, w_2 > 0$

$$\begin{aligned} w &= w_1 + w_2 - \sqrt{w_1^2 + w_2^2} \stackrel{!}{>} 0 \\ \Leftrightarrow w_1 + w_2 &> \sqrt{w_1^2 + w_2^2} \\ \Leftrightarrow (w_1 + w_2)^2 &> w_1^2 + w_2^2 \\ \Leftrightarrow w_1^2 + 2w_1w_2 + w_2^2 &> w_1^2 + w_2^2 \\ \Leftrightarrow 2w_1w_2 &> 0 \end{aligned}$$

- Sei oBdA $x \in \Omega_1, x \notin \bar{\Omega}_2. \Rightarrow w_1 > 0, w_2 < 0$

$$w = w_1 + w_2 - \sqrt{w_1^2 + w_2^2} < w_1 + w_2 - \sqrt{w_1^2} = w_1 + w_2 - w_1 = w_2 < 0$$

- Sei oBdA $x \in \partial\Omega_1, x \in \bar{\Omega}_2$. $w_1 = 0, w_2 > 0$

$$w = w_1 + w_2 - \sqrt{w_1^2 + w_2^2} = w_2 - \sqrt{w_2^2} = 0$$

- Sei oBdA $x \in \partial\Omega_1, x \notin \bar{\Omega}_2$. $w_1 = 0, w_2 < 0$

$$w = w_1 + w_2 - \sqrt{w_1^2 + w_2^2} = w_2 - \sqrt{w_2^2} = 2w_2 < 0$$

- Sei $x \notin \bar{\Omega}_1, x \notin \bar{\Omega}_2 \Rightarrow w_1 < 0, w_2 < 0$

$$w = w_1 + w_2 - \sqrt{w_1^2 + w_2^2} < 0$$

□

Beispiel 4.3. Sei $\Omega = [-1, 1] \times [-1, 1]$. Dann können wir Ω schreiben als $\Omega = \Omega_1 \cap \Omega_2$ mit $\Omega_1 = [-1, 1] \times (-\infty, \infty), \Omega_2 = (-\infty, \infty) \times [-1, 1]$. Dann sind

$$w_1(x, y) = -x^2 + 1$$

$$w_2(x, y) = -y^2 + 1$$

Gewichtsfunktionen auf Ω_1 bzw. Ω_2 . Nach Satz 4.2 ist dann die Gewichtsfunktion für Ω gegeben durch:

$$\begin{aligned} w(x, y) &= w_1(x, y) + w_2(x, y) - \sqrt{w_1(x, y)^2 + w_2(x, y)^2} \\ &= -x^2 + 1 - y^2 + 1 - \sqrt{(-x^2 + 1)^2 + (-y^2 + 1)^2} \\ &= -x^2 - y^2 + 2 - \sqrt{x^4 - 2x^2 + y^4 - 2y^2 + 2} \end{aligned}$$

Wir möchten jetzt einen Kern und Gewichtsfunktion verknüpfen und bekommen damit eine neue Funktion, die auf dem Rand unseres Definitionsgebiets konstant Null ist. Dazu betrachten wir wieder zwei verschiedene Ansätze.

4.3 Symmetrische Kollokation

Satz 4.4. *Sei Ω eine Menge, $K' : \Omega \times \Omega \rightarrow \mathbb{R}$ ein PD Kern und $g : \Omega \rightarrow \mathbb{R} \setminus \{0\}$ eine Funktion. Dann ist*

$$K(x, y) := g(x)K'(x, y)g(y)$$

ein Kern und es gilt für den entsprechenden RKHR:

$$\mathcal{H}_K(\Omega) = g\mathcal{H}_{K'}(\Omega) := \{gf | f \in \mathcal{H}_{K'}(\Omega)\}$$

Beweis. Wir zeigen zunächst, dass $\tilde{K}(x, y) := g(x)g(y)$ ein PD Kern ist.

Die Symmetrie ist offensichtlich, da

$$\tilde{K}(x, y) = g(x)g(y) = g(y)g(x) = \tilde{K}(y, x)$$

Zur positiven Definitheit betrachten wir eine Punktmenge $X_N := \{x_i \in \Omega | 1 \leq i \leq N\} \subset \Omega$. Wir erhalten für die Kernmatrix

$$A = \begin{pmatrix} g(x_1)g(x_1) & \cdots & g(x_1)g(x_N) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ g(x_N)g(x_1) & \cdots & g(x_N)g(x_N) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} g(x_1) \\ \vdots \\ g(x_N) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} g(x_1) & \cdots & g(x_N) \end{pmatrix} := \bar{g}\bar{g}^T$$

und damit für alle $\alpha \neq 0$

$$\alpha^T A \alpha = \alpha^T (\bar{g}\bar{g}^T) \alpha = (\alpha^T \bar{g}) (\bar{g}^T \alpha) = \|\bar{g}^T \alpha\|^2 \geq 0$$

Also ist \tilde{K} ein PD Kern.

Nach Satz 2.4 ist $K(x, y) = \tilde{K}(x, y)K'(x, y) = g(x)K'(x, y)g(y)$ ein PD Kern.

Es fehlt noch der zweite Teil des Satzes. Dafür stellen wir zunächst fest, dass für alle $y \in \Omega$

$$K(\cdot, y) = g(\cdot)K'(\cdot, y)g(y) \in g\mathcal{H}_{K'}(\Omega)$$

Als nächstes zeigen wir, dass $\mathcal{H}_K(\Omega)$ tatsächlich ein Hilbertraum ist. Sei dafür

$$\begin{aligned} s : \mathcal{H}_{K'}(\Omega) &\rightarrow g\mathcal{H}_{K'}(\Omega) \\ f &\mapsto gf \end{aligned}$$

s ist bijektiv, da $g \neq 0$ ist. Damit können wir auf $\mathcal{H}_K(\Omega)$ ein Skalarprodukt definieren:

$$\begin{aligned} (\cdot, \cdot)_{\mathcal{H}_K(\Omega)} : \mathcal{H}_K(\Omega) \times \mathcal{H}_K(\Omega) &\rightarrow \mathbb{R} \\ (gf, gh) &\mapsto \left(s^{-1}(gf), s^{-1}(gh) \right)_{\mathcal{H}_{K'}(\Omega)} = (f, h)_{\mathcal{H}_{K'}(\Omega)} \end{aligned}$$

Damit wird $\mathcal{H}_K(\Omega)$ zu einem Hilbertraum.

Wir zeigen noch die Reproduzierbarkeit auf $\mathcal{H}_K(\Omega)$, dann folgt aus der Eindeutigkeit des Kerns aus Satz 2.7 die Behauptung. Sei dafür $x \in \Omega$ und $h = gf \in \mathcal{H}_K(\Omega)$.

$$\begin{aligned} (h, K(\cdot, x))_{\mathcal{H}_K(\Omega)} &= (gf, gK'(\cdot, x)g(x))_{\mathcal{H}_K(\Omega)} \\ &= g(x) (gf, gK'(\cdot, x))_{\mathcal{H}_K(\Omega)} \\ &= g(x) (f, K'(\cdot, x))_{\mathcal{H}_{K'}(\Omega)} \\ &= g(x)f(x) \\ &= h(x) \end{aligned}$$

□

Wir haben jetzt einen neuen Kern konstruiert, der auf dem Rand unseres Definitionsgebiets konstant Null ist. Wenn wir jetzt noch zusätzlich annehmen, dass auch die Ableitung der Gewichtsfunktion wieder eine Gewichtsfunktion ist, können wir die Konstruktion aus Kapitel 3.1 verwenden.

Sei also $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ offen und beschränkt K' ein PD Kern, g eine Gewichtsfunktion auf Ω , für die auch ihre Ableitung eine Gewichtsfunktion auf Ω ist, und folgende PDE gegeben:

$$\begin{aligned} Lu(x) &= f(x), x \in \Omega \\ u(x) &= 0, x \in \partial\Omega \end{aligned}$$

Für ein $N \in \mathbb{N}$ betrachten wir eine Menge $X_N \subset \Omega^\circ$.

Wir definieren die Menge $\Lambda_N = \{\lambda_1, \dots, \lambda_N\}$ mit $\lambda_i = \delta_{x_i} \circ L$. Diese Funktionale sind im von $K(x, y) := g(x)K'(x, y)g(y)$ erzeugten RKHR stetig. Also wählen wir

$$\begin{aligned} V_N &= \text{span} \{ \lambda_1^y K(x, y), \dots, \lambda_N^y K(x, y) \} \\ &= \text{span} \{ (\delta_{x_1} \circ L)^y (g(x)K'(x, y)g(y)), \dots, (\delta_{x_N} \circ L)^y (g(x)K'(x, y)g(y)) \} \end{aligned}$$

als Ansatzfunktionen.

Damit erhalten wir folgenden Interpolanten:

$$\begin{aligned} s_u(x) &= \sum_{j=1}^N \alpha_j \lambda_j^y K(x, y) \\ &= \sum_{j=1}^N \alpha_j (\delta_{x_j} \circ L)^y (g(x)K'(x, y)g(y)) \end{aligned}$$

Die α_j erhält man als Lösung des LGS $A\alpha = b$ mit

$$\begin{aligned} A_{i,j} &= (\delta_{x_i} \circ L)^x (\delta_{x_j} \circ L)^y (g(x)K'(x, y)g(y)) \\ b_i &= f(x_i) \end{aligned}$$

Die Matrix A ist wieder symmetrisch und positiv definit und das LGS ist damit lösbar.

4.4 Nicht-Symmetrische Kollokation

Wie bei der Standardkollokation können wir einen wesentlich simpleren Ansatz wählen. Es sei die gleiche Problemstellung wie gerade gegeben, allerdings haben dieses Mal keine zusätzliche Anforderung an die Ableitung der Gewichtsfunktion. Wir wählen

$$V_N := \text{span} \{ g(x)K'(x, x_1), \dots, g(x)K'(x, x_N) \}$$

als Ansatzfunktionen und bekommen damit folgenden Interpolanten:

$$s_u(x) = \sum_{j=1}^N \alpha_j g(x)K'(x, x_j)$$

Die α_j erhält man als Lösung des LGS $A\alpha = b$ mit

$$\begin{aligned}A_{i,j} &= (\delta_{x_i} \circ L)^x(g(x)K(x, x_j)) \\ b_i &= f(x_i)\end{aligned}$$

Erneut kann man keine Aussage über die Lösbarkeit des LGS treffen.

Implementation

In diesem Kapitel möchten wir uns die Implementation der bisher theoretisch hergeleiteten Verfahren anschauen.

Dazu müssen wir zunächst einen geeigneten Kern wählen. Wir erinnern uns an Beispiel 2.5, dass die Kerne einen Parameter γ besitzen. In Abbildung 5.1 ist der Gauß Kern $K(x, y) = \exp(-\gamma\|x - y\|^2)$ mit $y = 0$ und verschiedenen γ Werten geplottet. So können wir eine ganze Familie an Kernen wählen, über die wir leicht iterieren können.

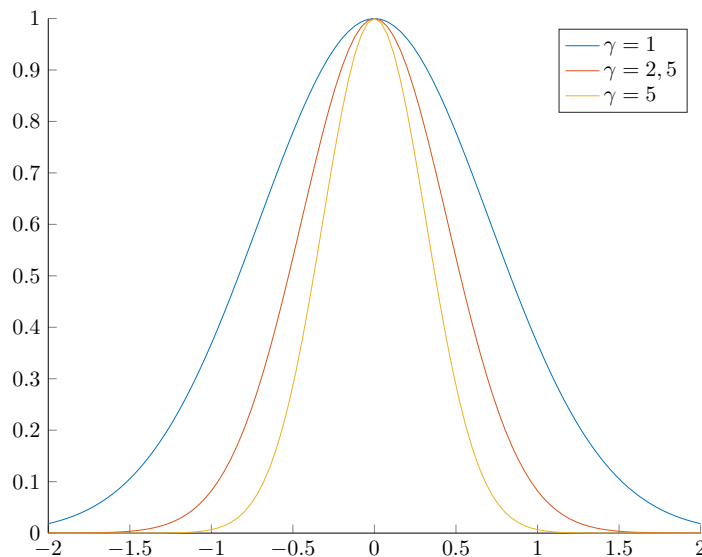


Abbildung 5.1: Plots verschiedener Kerne

So erhält man nach Wahl von Kollokations- und Testpunkten den Algorithmus 1.

Algorithm 1 Grundlegender Algorithmus

```
1: function SOLVEPDE( $X, X_{te}, f, g$ )
2:    $b \leftarrow \text{RIGHTSIDE}(X, f, g)$ 
3:    $\text{gamma} \leftarrow$  list of parameters
4:    $\text{minError} \leftarrow \infty$ 
5:   for  $i$  in  $\text{gamma}$  do
6:      $A \leftarrow \text{COLLOCATIONMATRIX}(X, i)$ 
7:      $\alpha \leftarrow A \backslash b$ 
8:      $\text{error} \leftarrow \text{CALCULATEERROR}(X, X_{te}, f, i)$ 
9:     if  $\text{error} < \text{minError}$  then
10:       $\text{retVal} \leftarrow \alpha$ 
11:       $\text{minError} \leftarrow \text{error}$ 
12:     end if
13:   end for
14:   return  $b$ 
15: end function
```

Einige Anmerkungen zu dem Algorithmus:

- Kollokationspunkte sind die Punkte, die wir bereits aus der theoretischen Herleitung kennen. Also die Punkte, an denen wir die Interpolation durchführen.
Testpunkte sind die Punkte, an denen wir den Fehler unserer Lösung bestimmen.
- f und g bezeichnen die rechte Seite der zu lösenden PDE.
- Der Algorithmus funktioniert so für die Standard und für die gewichtete Kollokation. Angepasst werden müssen nur die Unterfunktionen zum Aufstellen der rechten Seite und der Kollokationsmatrix.

Es ist noch offen wie wir die Kollokations- und Testpunkte und den Fehler in jeder Iteration bestimmen. Zuerst betrachten wir Letzteres. Dafür möchten wir zwei Möglichkeiten vorstellen:

- Falls wir eine analytisch bestimmte Lösung der PDE haben sollten, können wir diese mit der approximierten vergleichen. Sei dazu u die analytische Lösung und s_u die approximierte. Den Fehler bekommen wir dann mit

$$e = \max_{x \in X_{te}} (\|u(x) - s_u(x)\|)$$

-
- Eine analytische Lösung werden wir jedoch meist nicht besitzen und können die erste Methode somit nicht anwenden. Wir haben aber noch die Möglichkeit den Fehler in der Ableitung zu betrachten. Sei dafür L der Differentialoperator aus der PDE, f die rechte Seite in der PDE und s_u die approximierte Lösung. Den Fehler bekommen wir dann mit

$$e = \max_{x \in X_{te}} (\|f(x) - Ls_u(x)\|)$$

Ls_u lässt sich aufgrund der Linearität des Differentialoperators leicht berechnen. So kann man ausnutzen, dass s_u eine Linearkombination aus den einzelnen Basisfunktionen ist und kann L auf die einzelnen Summanden anwenden.

Kommen wir zur Bestimmung der Kollokationspunkte. Auch hier möchten wir mehrere Möglichkeiten vorstellen.

- Eine einfache Möglichkeit ist die Kollokationspunkte zufällig zu wählen.
- Man kann die Kollokationspunkte auch als Gitter über das Definitionsgebiet legen.
- Etwas komplizierter ist eine Greedy-Punktwahl. Man berechnet eine Lösung und bestimmt mit einem geeigneten Fehlerschätzer den Punkt mit dem größten Fehler. Dort setzt man einen neuen Kollokationspunkt und wiederholt das Verfahren.

Die Wahl der Testpunkte spielt keine all zu große Rolle, man sollte nur beachten, dass die möglichst disjunkt von den Kollokationszentren ist. NÄCHSTES KAPITEL OVERFITTING



Numerische Tests

Literatur

- 1 Wendland, H. 2005. *Scattered data approximation*. Bd. 17. Cambridge monographs on applied and computational mathematics. Cambridge: Cambridge University Press.
- 2 Santin, G. 2017. *Approximation with Kernel Methods*. Stuttgart.
- 3 Hon, Y. C. und R. Schaback. 2001. On unsymmetric collocation by radial basis functions. *Applied Mathematics and Computation* **119** (2-3), S. 177–186.

Akronyme

This document is incomplete. The external file associated with the glossary 'acronym' (which should be called `iswstud.acr`) hasn't been created.

Check the contents of the file `iswstud.acn`. If it's empty, that means you haven't indexed any of your entries in this glossary (using commands like `\gls` or `\glsadd`) so this list can't be generated. If the file isn't empty, the document build process hasn't been completed.

You may need to rerun \LaTeX . If you already have, it may be that \TeX 's shell escape doesn't allow you to run `xindy`. Check the transcript file `iswstud.log`. If the shell escape is disabled, try one of the following:

- Run the external (Lua) application:

```
makeglossaries-lite.lua "iswstud"
```

- Run the external (Perl) application:

```
makeglossaries "iswstud"
```

Then rerun \LaTeX on this document.

This message will be removed once the problem has been fixed.