Vorlesungsmitschrift

Reduzierte Basis Methoden

Universität Stuttgart, SS15
Prof. Dr. Bernard Haasdonk

Autoren:
Stefan Simeonov

Stand:
26. April 2015

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung

TODO

2 Grundlagen

Im Folgenden sei X (oder X_1, X_2) stets reeller Hilbertraum mit Skalarprodukt $\langle\,\cdot\,,\,\cdot\,\rangle_X$, Norm $\|\cdot\|_X$ und Dualraum X'. Subskript wird weggelassen falls keine Verwechslungsgefahr besteht.

Definition 2.1 (Parametrische Formen)
Sei $\mathcal{P} \subset \mathbb{R}^p$ beschränkte Parametermenge. Dann nennen wir

i) $l : X \times \mathcal{P} \to \mathbb{R}$ *parametrische stetige Linearform* falls $\forall \mu \in \mathcal{P}$:

$$l(\,\cdot\,;\mu) \in X'$$

ii) $a : X_1 \times X_2 \times \mathcal{P} \to \mathbb{R}$ eine *parametrische stetige* (symmetrische) *Bilinearform*, falls für alle $\mu \in \mathcal{P}$

$$a(\,\cdot\,,\cdot\,;\mu) : X_1 \times X_2 \to \mathbb{R} \quad \text{ist bilinear und stetig (symmetrisch)}$$

Wir bezeichnen die Stetigkeitskonstante mit

$$\gamma(\mu) := \sup_{u\in X_1} \sup_{v\in X_2} \frac{a(u,v;\mu)}{\|u\|_{X_1}\|v\|_{X_2}}$$

Falls $X_1 = X_2 =: X$ und $a(\,\cdot\,,\cdot\,;\mu)$ ist koerziv für alle $\mu \in \mathcal{P}$, so ist $a(\,\cdot\,,\cdot\,;\,\cdot\,)$ *parametrisch koerziv* und wir bezeichnen die Koerzivitätskonstante mit

$$\alpha(\mu) := \inf_{u\in X} \frac{a(u,u;\mu)}{\|u\|^2}$$

Bemerkung. Eine parametrische stetige Bi-/Linearform ist nicht unbedingt stetig bzgl. μ. Beispiel: $X = \mathbb{R}$, $\mathcal{P} = [0,1]$, $l : X \times \mathcal{P} \to \mathbb{R}$ definiert durch

$$l(x;\mu) := \begin{cases} x & \text{falls } \mu < \frac{1}{2} \\ \frac{1}{2}x & \text{sonst} \end{cases}$$

Definition 2.2 (Parametrische Beschränktheit / Lipschitz-Stetigkeit / Koerzivität)
Wir nennen

i) eine parametrische stetige Linearform l bzw. Bilinearform a *gleichmäßig beschränkt bzgl.* μ falls ex. $\bar{\gamma}_l, \bar{\gamma} < \infty$ mit

$$\sup_{\mu\in\mathcal{P}} \|l(\,\cdot\,;\mu)\|_{X'} \leq \bar{\gamma}_l \quad \text{bzw.} \quad \sup_{\mu\in\mathcal{P}} \gamma(\mu) \leq \bar{\gamma}$$

ii) *a gleichmäßig koerziv bzgl.* μ falls ex. $\bar{\alpha} > 0$ mit

$$\inf_{\mu\in\mathcal{P}} \alpha(\mu) \geq \bar{\alpha}$$

iii) l bzw. *a Lipschitz-stetig bzgl.* μ falls ex. L_l bzw. $L_a \in \mathbb{R}^+$, sodass $\forall \mu_1,\mu_2 \in \mathcal{P}$ gilt

$$|l(u;\mu_1) - l(u;\mu_2)| \leq L_l \|u\| \|\mu_1 - \mu_2\| \quad \forall u \in X$$

bzw.

$$|a(u,v;\mu_1) - a(u,v;\mu_2)| \leq L_a \|u\| \|v\| \|\mu_1 - \mu_2\| \quad \forall u \in X_1, v \in X_2$$

Definition 2.3 (Sensitivitätsableitung)
Sei $\mu_0 \in \mathcal{U} \subset \mathcal{P}$ in Umgebung $\mathcal{U}$ von μ_0. Wir nennen $f : \mathcal{U} \to X$ (Frechet)-differenzierbar in μ_0, falls ex. ein $\mathrm{D}f(\mu_0) \in L(\mathbb{R}^p, X)$ mit

$$\lim_{h\to 0} \frac{\|f(\mu_0 + h) - f(\mu_0) - \mathrm{D}f(\mu_0)h\|}{\|h\|} = 0$$

Falls f in jedem $\mu \in \mathcal{U}$ diffbar, dann existieren insbesondere partielle Ableitungen

$$\frac{\partial}{\partial \mu_i} f(\,\cdot\,) := \mathrm{D}f(\,\cdot\,)e_i : \mathcal{U} \to X$$

für $e_i \in \mathbb{R}^p$ Einheitsvektor $i = 1,\ldots,p$. Falls diese wiederrum diffbar in $\mathcal{U}$ bezeichnet allgemein

$$\partial_\sigma f(\,\cdot\,) := \frac{\partial^{|\sigma|}}{\partial_{\mu_1}^{\sigma_1} \cdots \partial_{\mu_p}^{\sigma_p}} f(\,\cdot\,) : \mathcal{U} \to X$$

die Sensitivitätsableitung der Ordnung $|\sigma| := \sum_{i=1}^p \sigma_i$ für Multiindex $\sigma = (\sigma_i)_{i=1}^p \in \mathbb{N}_0^p$.

Bemerkung. Diese Ableitungen werden später insbesondere bei parameterabhängigen Lösungen $u(x;\mu)$ verwendet:

$u : \Omega \times \mathcal{P} \to \mathbb{R}$ mit $u(\,\cdot\,;\mu) \in X$ kann auch als

$u : \mathcal{P} \to X$ aufgefasst werden mit Sensitivitätsableitungen

$\partial_\sigma u : \mathcal{P} \to X$, d.h. $\partial_\sigma u(\,\cdot\,;\mu) \in X \ \forall \mu \in \mathcal{P}$ und insbesondere

$\partial_\sigma u : \Omega \times \mathcal{P} \to \mathbb{R}$, d.h. ∂_σ sind wieder Funktionen auf Ω

Definition 2.4 (Separierbare Parameterabhängigkeit)

i) Eine Funktion $v : \mathcal{P} \to X$ nennen wir *separierbar parametrisch*, falls existieren *Komponenten* $v^q \in X$ und *Koeffizientenfunktionen* $\Theta_v^q : \mathcal{P} \to \mathbb{R}$ für $q = 1,\ldots,Q_v$ mit

$$v(\mu) = \sum_{q=1}^{Q_v} \Theta_v^q(\mu)\, v^q$$

ii) Eine parametrische stetige Linearform $l : X \times \mathcal{P} \to \mathbb{R}$ bzw. Bilinearform $a : X_1 \times X_2 \times \mathcal{P} \to \mathbb{R}$ ist separierbar parametrisch, falls existieren $l^q \in X'$ und $\Theta_l^q : \mathcal{P} \to \mathbb{R}$ für $q = 1, \dots, Q_l$ bzw. $a^q : X_1 \times X_2 \to \mathbb{R}$ stetig, bilinear und $\Theta_a^q : \mathcal{P} \to \mathbb{R}$ für $q = 1, \dots, Q_a$ mit

$$l(v;\mu) = \sum_{q=1}^{Q_l} \Theta_l^q(\mu)\, l^q(v) \qquad \forall v \in X, \mu \in \mathcal{P}$$

$$a(u,v;\mu) = \sum_{q=1}^{Q_a} \Theta_a^q(\mu)\, a^q(u,v) \qquad \forall u \in X_1, v \in X_2, \mu \in \mathcal{P}$$

Bemerkung.

i) In Literatur auch “affine Annahme” oder “affin parametrisch” verwendet. Wir verwenden jedoch “separierbar”, da Θ_l^q auch nichtlinear sein können.

ii) Q_a, Q_l sollten möglichst klein sein, weil diese in die Online-Komplexität eingehen, siehe **??**.

Satz 2.5 (Energienorm)
Sei $a : X \times X \times \mathcal{P} \to \mathbb{R}$ parametrische stetige, koerzive Bilinearform, und $a_s(u,v;\mu) = \frac{1}{2}(a(u,v;\mu) + a(v,u;\mu))$ der symmetrische Anteil. Dann ist für $\mu \in \mathcal{P}$

$$\langle u, v \rangle_\mu := a_s(u,v;\mu) \quad \text{bzw.} \quad \|u\|_\mu := \sqrt{\langle u, u \rangle_\mu}$$

das *Energie-Skalarprodukt* bzw. die *Energienorm* bzgl. μ. Diese ist äquivalent zu $\|\cdot\|_X$:

$$\sqrt{\alpha(\mu)}\|u\| \leq \|u\|_\mu \leq \sqrt{\gamma(\mu)}\|u\|$$

Beweis. Skalarprodukt: klar wegen Bilinearität, Stetigkeit und Koerzivität. Normäquivalenz folgt aus Stetigkeit und Koerzivität von a_s.

$$\alpha(\mu)\|u\|^2 \leq \underbrace{a(u,u;\mu)}_{\leq \|u\|^2 \gamma(\mu)} = a_s(u,u;\mu) = \|u\|_\mu^2$$

□

Satz 2.6 (Übertragung von Koeffizienten-Eigenschaften)
Seien f bzw. a separierbar parametrische stetige Linear- bzw. Bilinearform.

i) Falls $\Theta_f^q(\mu)$ bzw. $\Theta_a^q(\mu)$ beschränkt sind, dann sind f bzw. a gleichmäßig beschränkt bzgl. μ.

ii) Falls $\Theta_a^q(\mu)$ strikt positiv, d.h. ex. $\bar{\Theta}$ mit $\Theta_a^q(\mu) \geq \bar{\Theta} > 0 \; \forall \mu \in \mathcal{P}$ alle Komponenten positiv semidefinit, d.h. $a^q(v,v) \geq 0 \; \forall v,q$ und $a(\cdot\,,\cdot\,;\bar{\mu})$ ist koerziv für mindestens ein $\bar{\mu} \in \mathcal{P}$, dann ist a gleichmäßig koerziv bzgl. μ.

iii) Falls Θ_f^q, Θ_a^q Lipschitz-stetig, so ist f, a Lipschitz-stetig bzgl. μ.

Beweis.

i) Sei $\bar{\Theta}_f^q \in \mathbb{R}^+$ mit $|\Theta_f^q(\mu)| \le \bar{\Theta}_f^q \; \forall \mu$. Dann gilt

$$\|f(\,\cdot\,;\mu)\| = \|\sum_q \Theta_f^q(\mu)\, f^q\| \le \sum_q |\Theta_f^q(\mu)|\|f^q\| \le \sum_q \bar{\Theta}_f^q \,\|f^q\| =: \bar{\gamma}_f < \infty$$

analog für $a(\,\cdot\,,\cdot\,;\mu)$.

ii) Für $u \in X$, $\mu \in \mathcal{P}$ gilt

$$a(u,u;\mu) = \sum_q \Theta_a^q(\mu)\, a^q(u,u) = \sum_q \underbrace{\frac{\Theta_a^q(\mu)}{\Theta_a^q(\bar{\mu})}}_{>0} \underbrace{\Theta_a^q(\bar{\mu})\, a^q(u,u)}_{\sum(\,\cdot\,)=a(u,u;\bar{\mu})} \ge \underbrace{\sum_q \frac{\bar{\Theta}}{\max_{q'} \Theta_a^{q'}(\bar{\mu})} \alpha(\bar{\mu})}_{=:\bar{\alpha}>0} \|u\|^2$$

iii) Sei $|\Theta_f^q(\mu_1) - \Theta_f^q(\mu_2)| \le L_f^q|\mu_1 - \mu_2| \; \forall \mu_1,\mu_2 \in \mathcal{P}$ mit geeignetem $L_f^q \in \mathbb{R}$. Dann gilt

$$\begin{aligned}
|f(v;\mu_1) - f(v;\mu_2)| &= |\sum_q \Theta_f^q(\mu_1)\, f^q(v) - \sum_q \Theta_f^q(\mu_2)\, f^q(v)| \\
&\le \sum_q |\Theta_f^q(\mu_1) - \Theta_f^q(\mu_2)|\|f^q\|\|v\| \\
&\le \underbrace{\sum_q L_f^q \|f^q\|}_{=:L_f} \|\mu_1 - \mu_2\|\|v\|
\end{aligned}$$

analog für $a(\,\cdot\,,\cdot\,;\mu)$.

□

Definition 2.7 (Volles Problem $\big(P(\mu)\big)$)
Seien a bzw. f, l parametrische Bilinearform bzw. Linearform und gleichmäßig stetig bzgl. μ, sei a gleichmäßig koerziv bzgl. μ. Dann ist für $\mu \in \mathcal{P}$ gesucht $u(\mu) \in X$ und $s(\mu) \in \mathbb{R}$ als Lösung von

$$\begin{aligned}
a(u(\mu),v;\mu) &= f(v;\mu) && \forall v \in X \\
s(\mu) &:= l(u(\mu);\mu)
\end{aligned}$$

Bemerkung.

- Das volle Problem kann also ein analytisches Modell (PDE) oder ein detailliertes Modell (PDE-Diskretisierung) darstellen.
- Symmetrie von a wird nicht vorausgesetzt.

- In **??**, **??** werden Verallgemeinerungen von $\big(P(\mu)\big)$ betrachtet.

Satz 2.8 (Wohlgestelltheit und Stabilität)
Das Problem $\big(P(\mu)\big)$ besitzt eine eindeutige Lösung mit

$$\|u(\mu)\| \leq \frac{\|f(\mu)\|_{X'}}{\alpha(\mu)} \leq \frac{\bar{\gamma}_f}{\bar{\alpha}}, \quad |s(\mu)| \leq \|l(\mu)\|_{X'}\|u(\mu)\| \leq \frac{\bar{\gamma}_l\bar{\gamma}_f}{\bar{\alpha}}$$

Beweis. Existenz, Eindeutigkeit und Schranke für $u(\mu)$ folgen mit Lax-Milgram (siehe z.B. Satz 2.5 in Braess'03). Gleichmäßige Stetigkeit und Koerzivität ergeben μ-unabhängige Schranke für $u(\mu)$. Definition von $s(\mu)$ ergibt Eindeutigkeit und entsprechende Schranken. □

Definition 2.9 (Lösungsmannigfaltigkeit)
Wir definieren

$$\mathcal{M} := \{u(\mu) \in X : \mu \in \mathcal{P} \text{ und } u(\mu) \text{ löst } \big(P(\mu)\big)\}$$

Bemerkung. Wir verwenden den Begriff "Mannigfaltigkeit" nicht im strengen differentialgeometrischen Sinn, weil keine Stetigkeit / Diffbarkeit von $\mathcal{M}$ gefordert wird.

Beispiel 2.10 (Thermischer Block)
TODO

Beispiel 2.11 (Matrixgleichung)

- Zu $\mu \in \mathcal{P}$ suche $u(\mu) \in \mathbb{R}^H$ als Lösung von

  $$A(\mu)u(\mu) = b(\mu)$$

  für $A(\mu) \in \mathbb{R}^{H\times H}$ und $b(\mu) \in \mathbb{R}^H$.

- Dies ist Beispiel für $\big(P(\mu)\big)$ via

  $$X := \mathbb{R}^H, \quad a(u,v;\mu) := v^\top A(\mu)u, \quad f(v;\mu) := v^\top b(\mu)$$

  und beliebiger linearer Ausgabe $l(v;\mu) := \underline{l}^\top v$ für $\underline{l} \in \mathbb{R}^H$.

Beispiel 2.12 ($Q_a = 1$)
Falls $a(\,\cdot\,,\cdot\,;\mu)$, $f(\,\cdot\,;\mu)$ separierbar parametrisch mit $Q_a = 1$ und Q_f beliebig, so ist $\mathcal{M}$ enthalten in einem Q_f-dimensionalen linearen Teilraum von X:

$$\big(P(\mu)\big) \quad \Rightarrow \quad \Theta_a^1(\mu)a^1(u,v) = \sum_q \Theta_f^q(\mu)f^q(v) \quad \forall v \in X$$

$\Theta_a^1(\mu) \neq 0$ wegen a gleichmäßig koerziv

$$a^1(u,v) = \sum_q \frac{\Theta_f^q(\mu)}{\Theta_a^1(\mu)} f^q(v) \quad \forall v \in X \qquad (*)$$

$a^1(\,\cdot\,,\cdot\,)$ ist koerziv, f^q linear und stetig

$$\overset{\text{Lax-Milgram}}{\Rightarrow} \text{ex. } u^q, q = 1,\ldots,Q_f \text{ mit } a^1(u^q,v) = f^q(v), \quad v \in X$$
$$\Rightarrow u := \sum_q \frac{\Theta_f^q(\mu)}{\Theta_a^1(\mu)} u^q \text{ löst } (*) \text{ wegen Linearität}$$
$$\Rightarrow u \in \operatorname{span}\{u^q\}_{q=1}^{Q_f}$$

Beispiel 2.13 ($\big(P(\mu)\big)$ mit vorgegebener Lösung)
Sei $u : \mathcal{P} \to X$ beliebig komplizierte Abbildung. Dann existiert ein $\big(P(\mu)\big)$ mit $u(\mu)$ als Lösung via Skalarprodukten:

$$a(v,w;\mu) := \langle w, v\rangle_X, \quad f(v;\mu) := \langle u(\mu), v\rangle_X$$

d.h. Klasse der Probleme $\big(P(\mu)\big)$ können beliebig komplizierte, nichtglatte oder sogar unstetige Lösungsmannigfaltigkeit $\mathcal{M}$ besitzen.

Bemerkung (Parameter-Anzahl und Lösungskomplexität)**.** Es gibt (sogar in der Literatur) ein Missverständnis zwischen Parameteranzahl $p \in \mathbb{N}$ und Komplexität der Lösungsmannigfaltigkeit $\mathcal{M}$, denn es kann Redundanz in Parametern vorliegen (siehe Thermischer Block). Extremfall: $p \in \mathbb{N}$ beliebig, für geeignetes $a(\,\cdot\,,\cdot\,;\mu)$, $f(\mu)$ hat $\big(P(\mu)\big)$ ein $\mathcal{M}$, welches in einem 1D-Raum enthalten ist. (Übung) Beispiel 2.13 zeigt andererseits einen anderen Extremfall: Sogar für $p = 1$ kann bei geeignetem $\big(P(\mu)\big)$ das $\mathcal{M}$ beliebig kompliziert sein (z.B. "Raumfüllende Kurve"). Unter geeigneter Annahmen an $a(\,\cdot\,,\cdot\,;\mu)$ und $f(\,\cdot\,;\mu)$ können einfache Regularitätseigenschaften von $u(\mu)$ bzw. $\mathcal{M}$ geschlossen werden.

Korollar 2.14 (Beschränktheit von $\mathcal{M}$)
Weil $a(\,\cdot\,,\cdot\,;\mu)$ gleichmäßig koerziv und $f(\,\cdot\,;\mu)$ gleichmäßig beschränkt, so ist $\mathcal{M}$ beschränkt

$$\mathcal{M} \subseteq B_{\frac{\bar{\gamma}_f}{\bar{\alpha}}}(0)$$

Beweis. Klar weil $\|u(\mu)\| \le \frac{\bar{\gamma}_f}{\bar{\alpha}}$ nach Satz 2.8. □

Satz 2.15 (Lipschitz-Stetigkeit)
Falls $a(\,\cdot\,,\cdot\,;\mu)$, $f(\,\cdot\,;\mu)$, $l(\,\cdot\,;\mu)$ Lipschitz-stetig bzgl. μ, so sind $u(\mu)$ und $s(\mu)$ Lipschitz-stetig bzgl. μ mit Lipschitz-Konstanten

$$L_u = \frac{L_f}{\bar{\alpha}} + \bar{\gamma}_f \frac{L_a}{\bar{\alpha}^2} \quad \text{und} \quad L_s = L_l \frac{\bar{\gamma}_f}{\bar{\alpha}} + \bar{\gamma}_l L_u$$

Beweis. Übung. □

Satz 2.16 (Diffbarkeit)
Sei $a(u,\cdot\,;\mu) \in X'$ Frechet-diffbar in Umgebung von $(u_0,\mu_0) \subset X \times \mathcal{P}$ und $f(\,\cdot\,;\mu) \in X'$

Frechet-diffbar in Umgebung von $\mu_0 \in \mathcal{P}$. Dann ist Lösung $u(\mu)$ von $\big(P(\mu)\big)$ Frechet-diffbar in Umgebung von $\mu_0 \in \mathcal{P}$ mit

$$\mathrm{D}_\mu u(\mu) := -\left(\frac{\partial}{\partial u}F(u,\mu)\right)^{-1}\frac{\partial}{\partial \mu}F(u,\mu)$$

wobei $F(u,\mu) := a(u,\cdot\,;\mu) - f(\,\cdot\,;\mu) \in X'$.

Beweis. Aus Frechet-Diffbarkeit von $a(\,\cdot\,,\cdot\,;\,\cdot\,)$ und $f(\,\cdot\,;\,\cdot\,)$ folgt Frechet-Diffbarkeit von $F : X \times \mathcal{P} \to X'$ in Umgebung von (u_0,μ_0) mit partiellen Ableitungen

$$\frac{\partial}{\partial \mu}F(u_0,\mu_0) := \frac{\partial}{\partial \mu}a(u_0,\cdot\,;\mu_0) - \frac{\partial}{\partial \mu}f(\,\cdot\,;\mu_0) \in L(\mathbb{R}^p,X')$$

und $\frac{\partial}{\partial u}F(u_0,\mu_0) \in L(X,X')$ durch

$$\frac{\partial}{\partial u}F(u_0,\mu_0)h_u := a(h_u,\cdot\,;\mu_0) \in X' \quad \forall h_u \in X$$

Dann erfüllt $u(\mu)$ als Lösung von $\big(P(\mu)\big)$ gerade

$$F(u(\mu),\mu) = 0$$

in Umgebung von μ_0. Dann ist (z.B. mit Folgerung 2.15 in Ruzicka: Nichtlineare Funktionalanalysis, Springer 2004) auch $u(\mu)$ Frechet-diffbar in Umgebung von μ_0 mit Ableitung

$$\mathrm{D}_\mu u(\mu) := -\left(\frac{\partial}{\partial u}F(u,\mu)\right)^{-1}\frac{\partial}{\partial \mu}F(u,\mu)$$

□

Bemerkung.

- Plausibilität der Ableitungsformel folgt aus formellem Ableiten:

$$\begin{aligned}
& & \mathrm{D}_\mu\left(F(u(\mu),\mu)\right) &= 0\\
\Rightarrow & & \frac{\partial}{\partial u}F(u(\mu),\mu)\mathrm{D}_\mu u(\mu) + \frac{\partial}{\partial \mu}F(u,\mu) &= 0\\
\Rightarrow & & \frac{\partial}{\partial u}F(u(\mu),\mu)\mathrm{D}_\mu u(\mu) &= -\frac{\partial}{\partial \mu}F(u,\mu)\\
\Rightarrow & & \mathrm{D}_\mu u(\mu) &= -\left(\frac{\partial}{\partial u}F(u(\mu),\mu)\right)^{-1}\frac{\partial}{\partial \mu}F(u,\mu)
\end{aligned}$$

- Man kann zeigen, dass die Sensitivitäts-Ableitungen $\partial_{\mu_i}u(\mu) \in X$ für $i = 1,\ldots,p$ erfüllen das sogenannte *Sensitivitätsproblem*

$$a(\partial_{\mu_i}u(\mu),v;\mu) = \tilde{f}_i(v;u(\mu),\mu)$$

mit rechter Seite $\tilde{f}_i(\cdot\,; u(\mu),\mu) \in X'$ gegeben durch

$$\tilde{f}_i(\cdot\,; w,\mu) := \partial_{\mu_i} f(\cdot\,; \mu) - \partial_{\mu_i} a(w, \cdot\,; \mu)$$

d.h. das Problem $\big(P(\mu)\big)$ mit modifizierter rechter Seite, in welcher insbesondere $u(\mu)$ eingeht. (Übung)

- Hinreichend für die Diffbarkeit von a, f in Satz 2.16 sind z.B. im Fall von separierbarer Parameterabhängigkeit die Diffbarkeit der Koeffizienten $\Theta_a^q(\mu)$, $\Theta_f^q(\mu)$, $q = 1, \ldots$ (Übung)
- Ähnliche Aussagen / Sensitivitätsprobleme gelten für Ableitungen höherer Ordnung. Also überträgt sich Glattheit der Koeffizientenfunktionen auf Glattheit der Lösung / Mannigfaltigkeit.