

MODRIO (deutscher Anteil) Kick-off Meeting

Erlangen, 10.10.2012

Optimierter Betrieb von Kraftwerksanlagen mit Nonlinear Model Predictive Control (NMPC)

Prof. Dr.-Ing. Pu Li

Fachgebiet **S**imulation und **O**ptimale **P**rozesse (**SOP**)
Institut für Automatisierungs- und Systemtechnik
Technische Universität Ilmenau

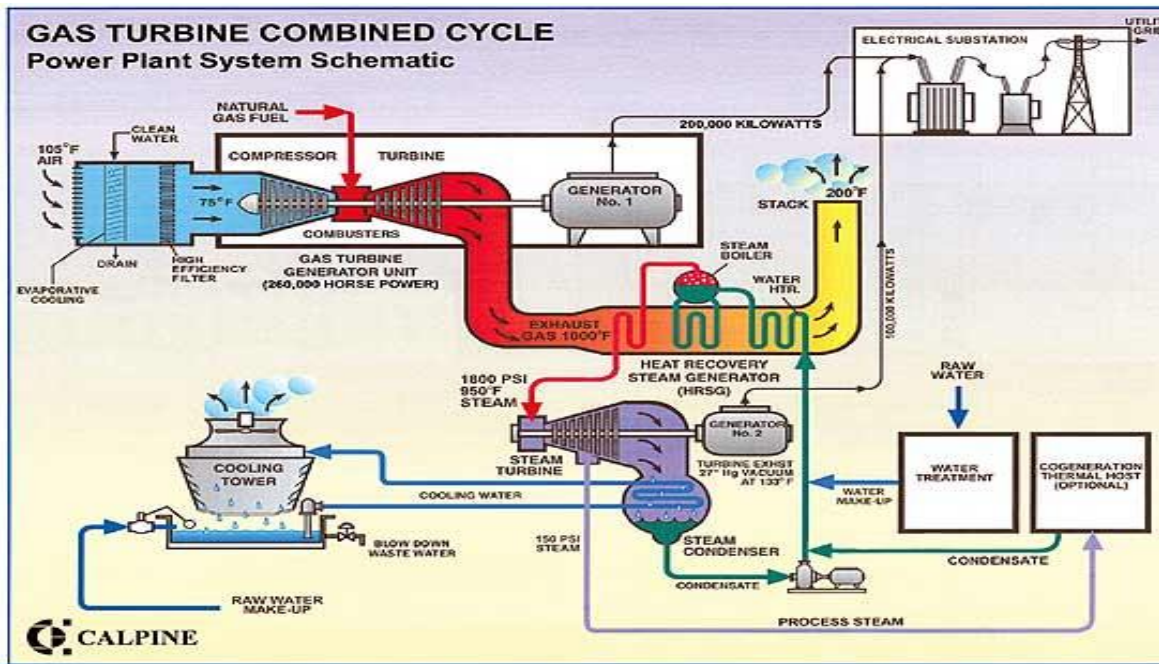
Inhalte

1. Motivation
2. Kompetenzen SOP
3. Aufgabenstellung
4. Arbeitspunkte
5. Zeitplan

Motivation: optimaler Betrieb mit NMPC

Herausforderungen:

- hochdimensional, dynamisch, nichtlinear, beschränkt, mit großer Zeitverzögerung
- Modellauswahl, Parameterbestimmung, Anfangszustandsschätzung



Störungen:

- Lastwechsel
- Feedwechsel
- Änderung der Marktbedingung
- Änderung der Umgebung

Motivation: optimaler Betrieb mit NMPC

Nichtlineares Optimalsteuerungsproblem

$$\begin{aligned} \min_{u(t), x(t), y(t), \theta} & \left\{ J = \Phi(x_f, y_f, t_f, \theta) + \int_{t_0}^{t_f} L(x(t), y(t), u(t), \theta) dt \right\} \\ \text{s.t.} & \quad \dot{x}(t) = f(x(t), y(t), u(t), t, \theta) & x(t_0) = x_0 \\ & \quad 0 = g(x(t), y(t), u(t), t, \theta) & t \in [t_0, t_f] \\ & \quad 0 \leq h(x(t), y(t), u(t), t, \theta) \\ & \quad 0 = r_e(x(t_i), y(t_i), \theta) \\ & \quad 0 \leq r_i(x(t_i), y(t_i), \theta) \end{aligned}$$

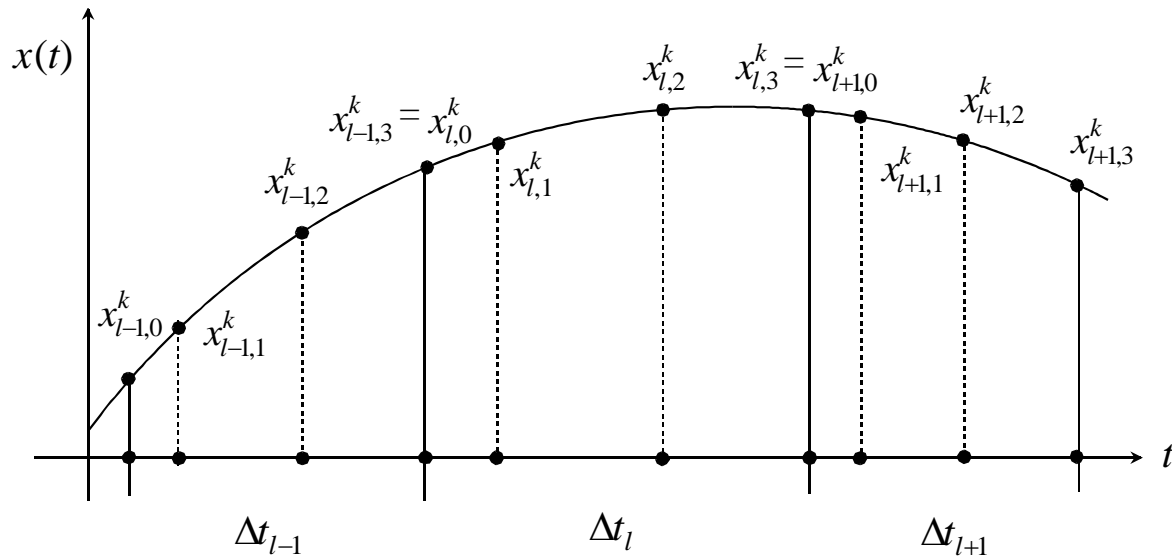
Schwierigkeiten bei der online Realisierung:

- Hohe Berechnungseffizienz zur Lösung
- Modellparameterschätzung
- Prozesszustandsschätzung

Kompetenzen SOP:

Das quasi-sequentielle (QS) Verfahren mit der Kollokation

Hong, Li, et al., *AIChE Journal*, 2006



$$x_l(t) = \sum_{j=0}^{NC} P_j(t) x_{l,j} = \sum_{j=0}^{NC} \left[\prod_{\substack{i=0 \\ i \neq j}}^{NC} \frac{t - t_i}{t_j - t_i} \right] x_{l,j} \quad l = 1, \dots, NL$$

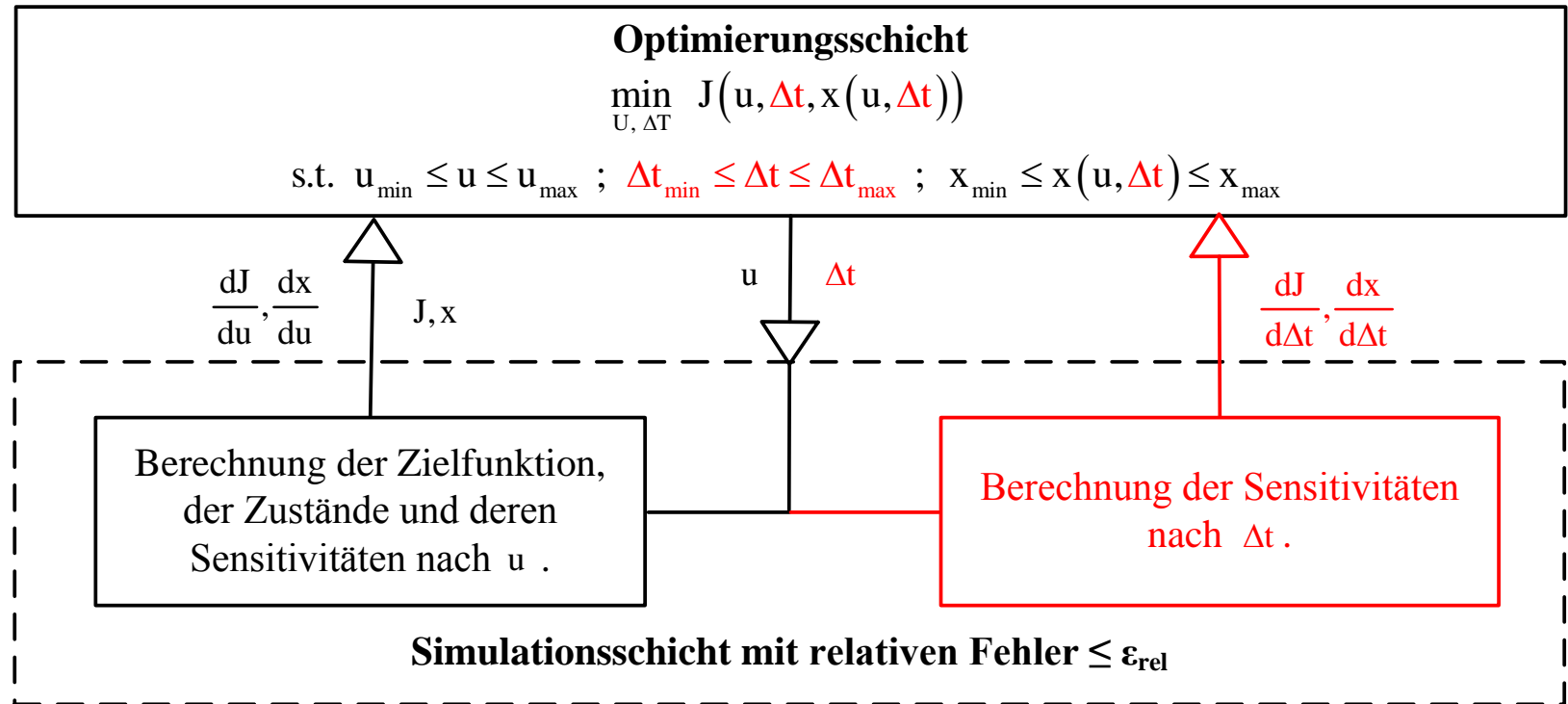
wobei NC : Anzahl der Kollokationspunkte in einem Zeitintervall

NL : Anzahl der Zeitintervalle in dem Zeithorizont

Kompetenzen SOP:

Das erweiterte QS-Verfahren mit garantierter Genauigkeit

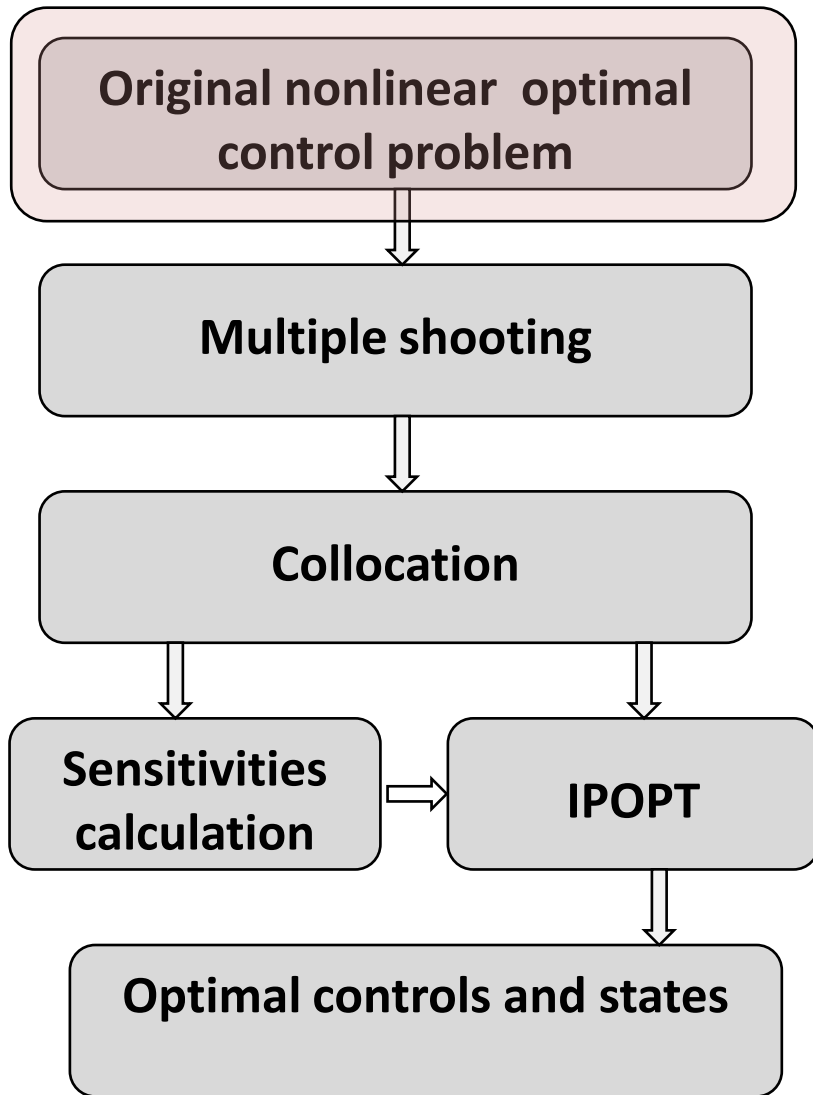
Bartl, Li, et al., AIChE Journal, 2011



Subintervalle werden eingeführt, wenn die angeforderte Zustandsgenauigkeit nicht erreicht ist.

Kompetenzen SOP:

Mehrfachschieß kombiniert mit Kollokation



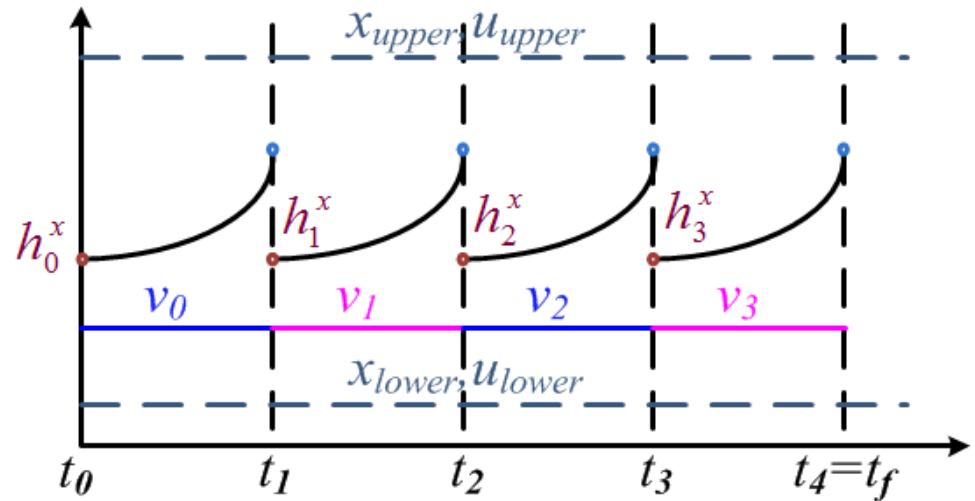
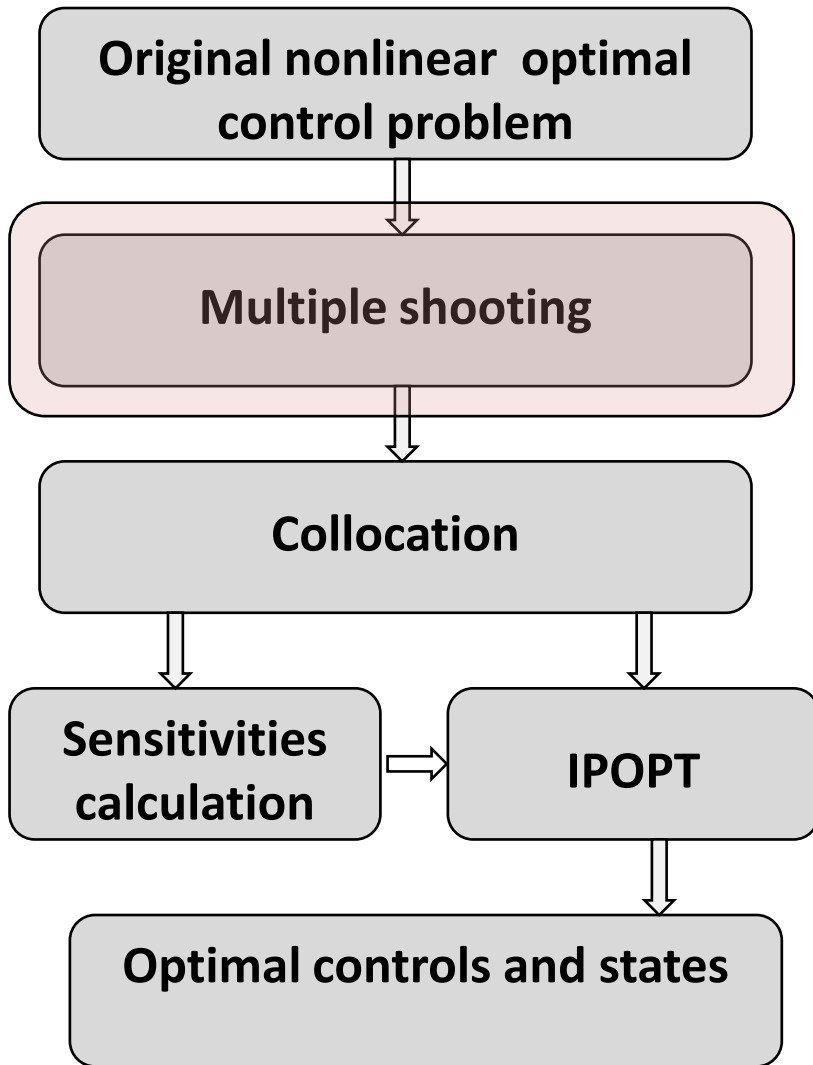
$$\min_{x,u} J(x(t), u(t), t)$$

$$\text{s. t. } x(t_0) = x_0$$

$$\dot{x}(t) = f(x(t), u(t), t),$$

$$u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max},$$

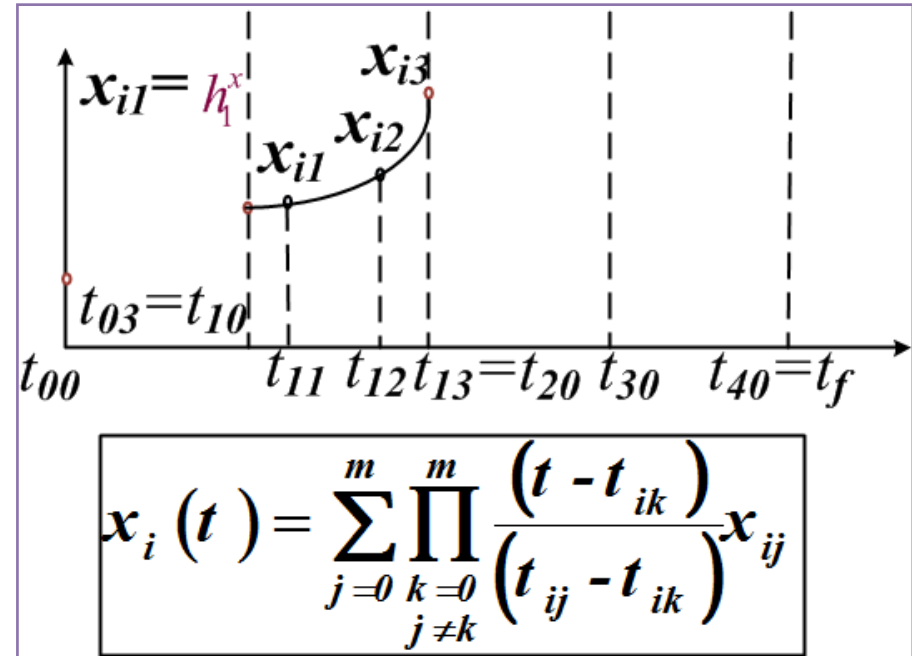
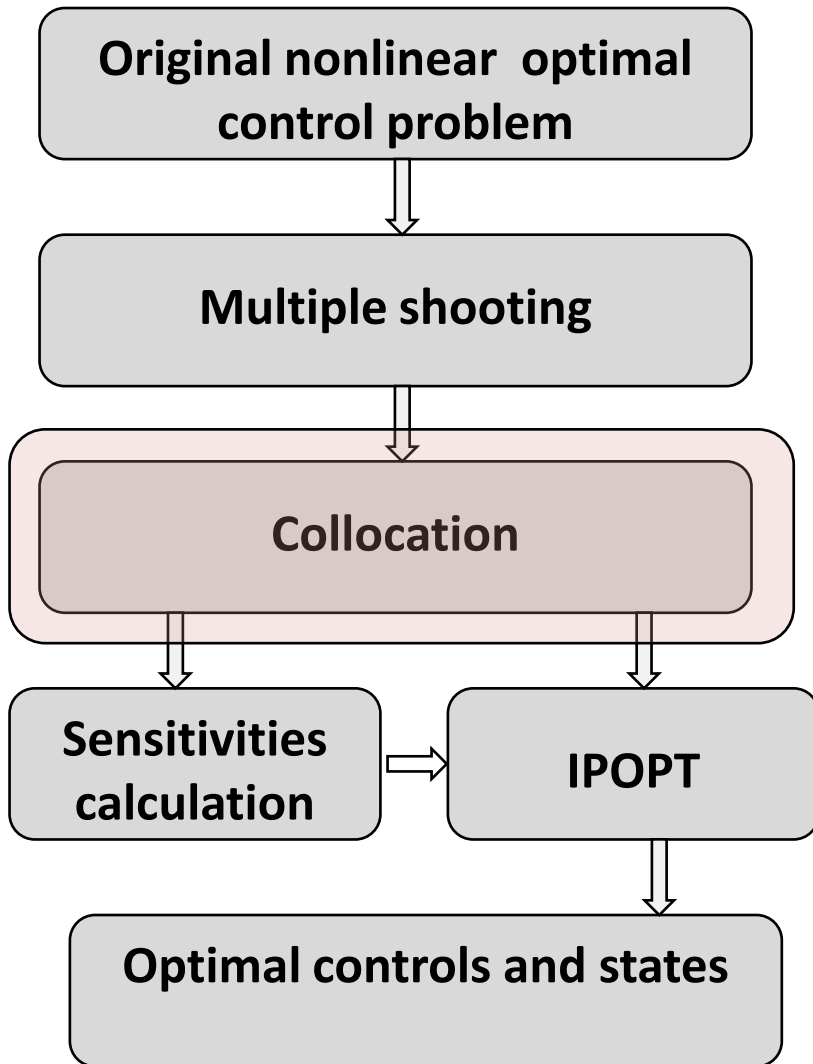
$$x_{\min} \leq x(t) \leq x_{\max},$$

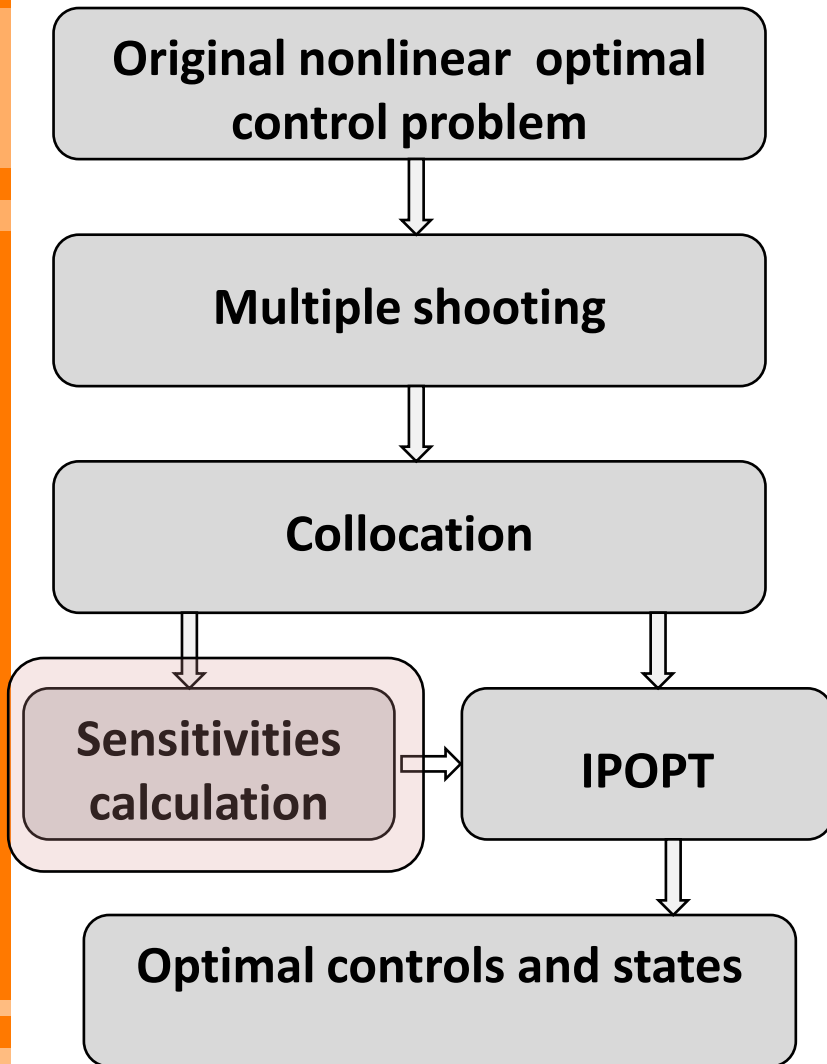


$$\min_{v_i, h_i^x} A(v_i, h_i^x).$$

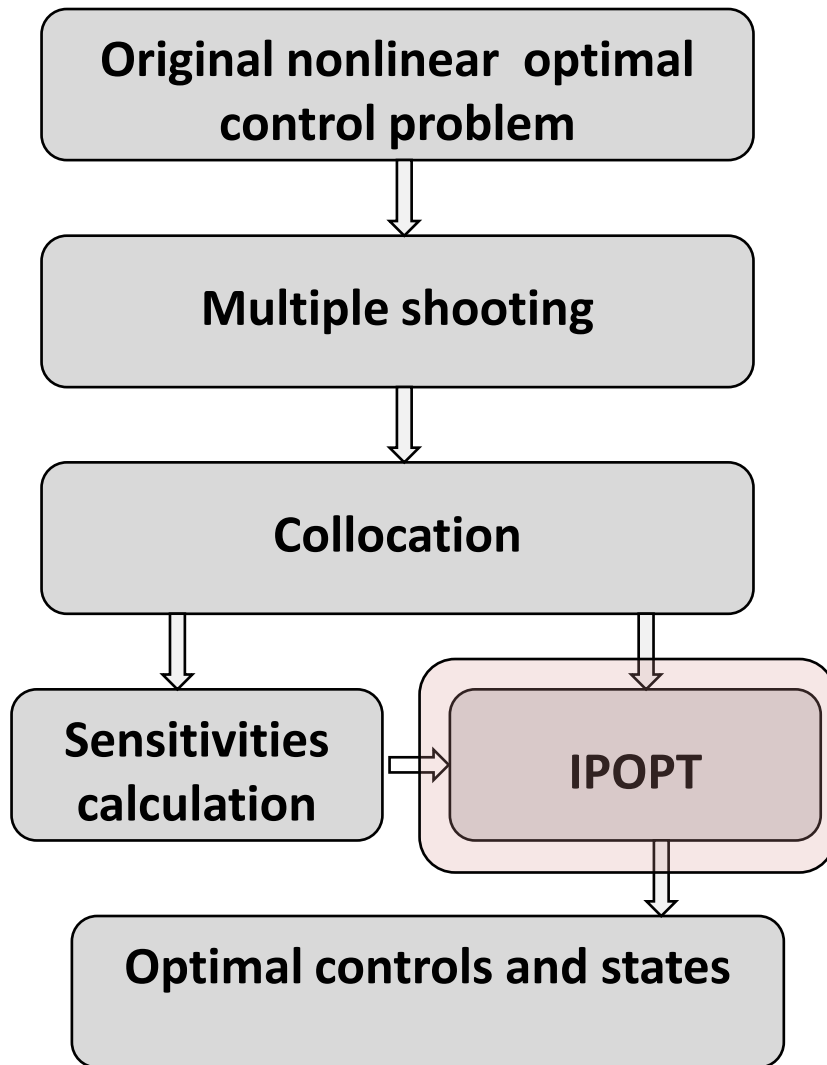
$$\text{s.t. } B(v_i, h_i^x) = 0$$

$$C_{\min} \leq C(v_i, h_i^x) \leq C_{\max}$$





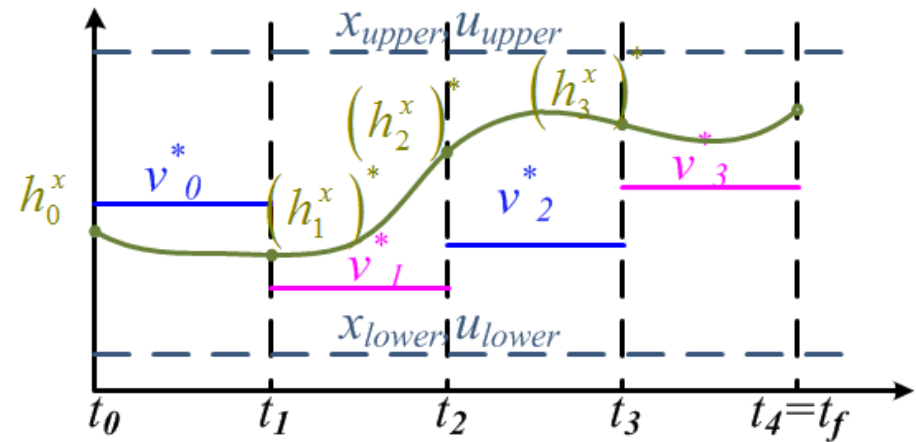
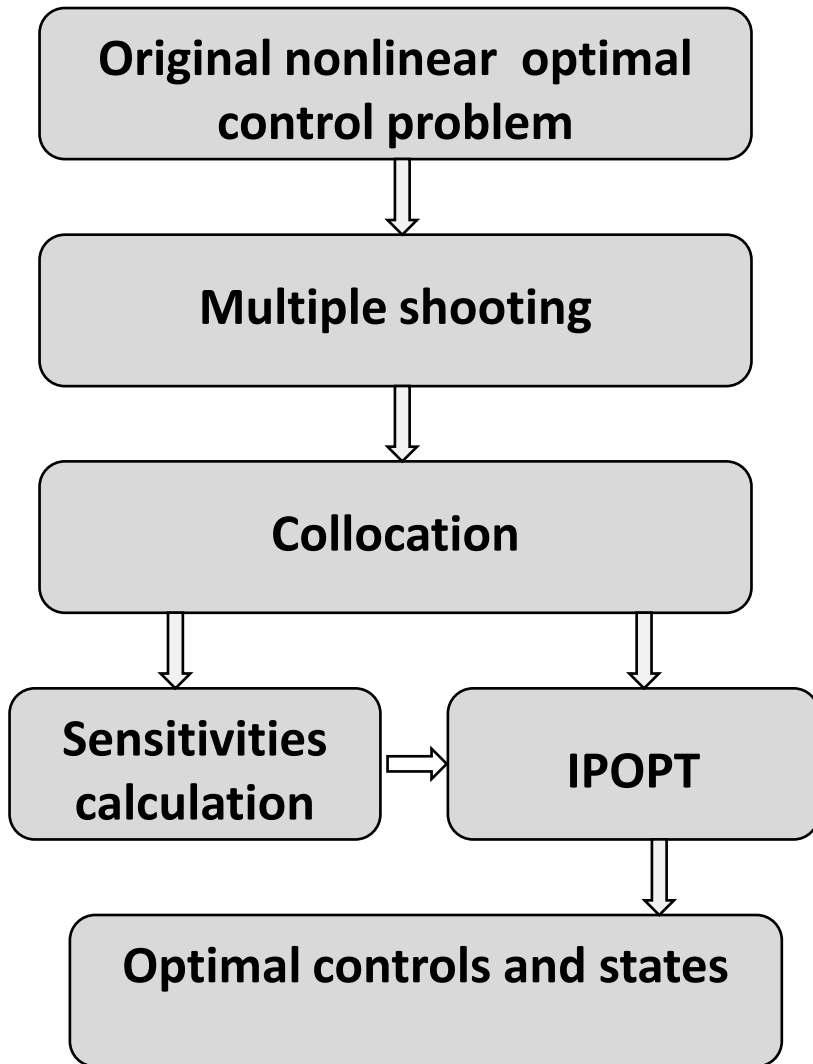
$$\begin{array}{cc}
 \nabla_{v_i} A & \nabla_{h_i^x} A \\
 \frac{\partial B}{\partial v_i} & \frac{\partial B}{\partial h_i^x} \\
 \frac{\partial C}{\partial v_i} & \frac{\partial C}{\partial h_i^x}
 \end{array}$$



$$\min_{v_i, h_i^x} A(v_i, h_i^x).$$

$$\text{s.t. } B(v_i, h_i^x) = 0$$

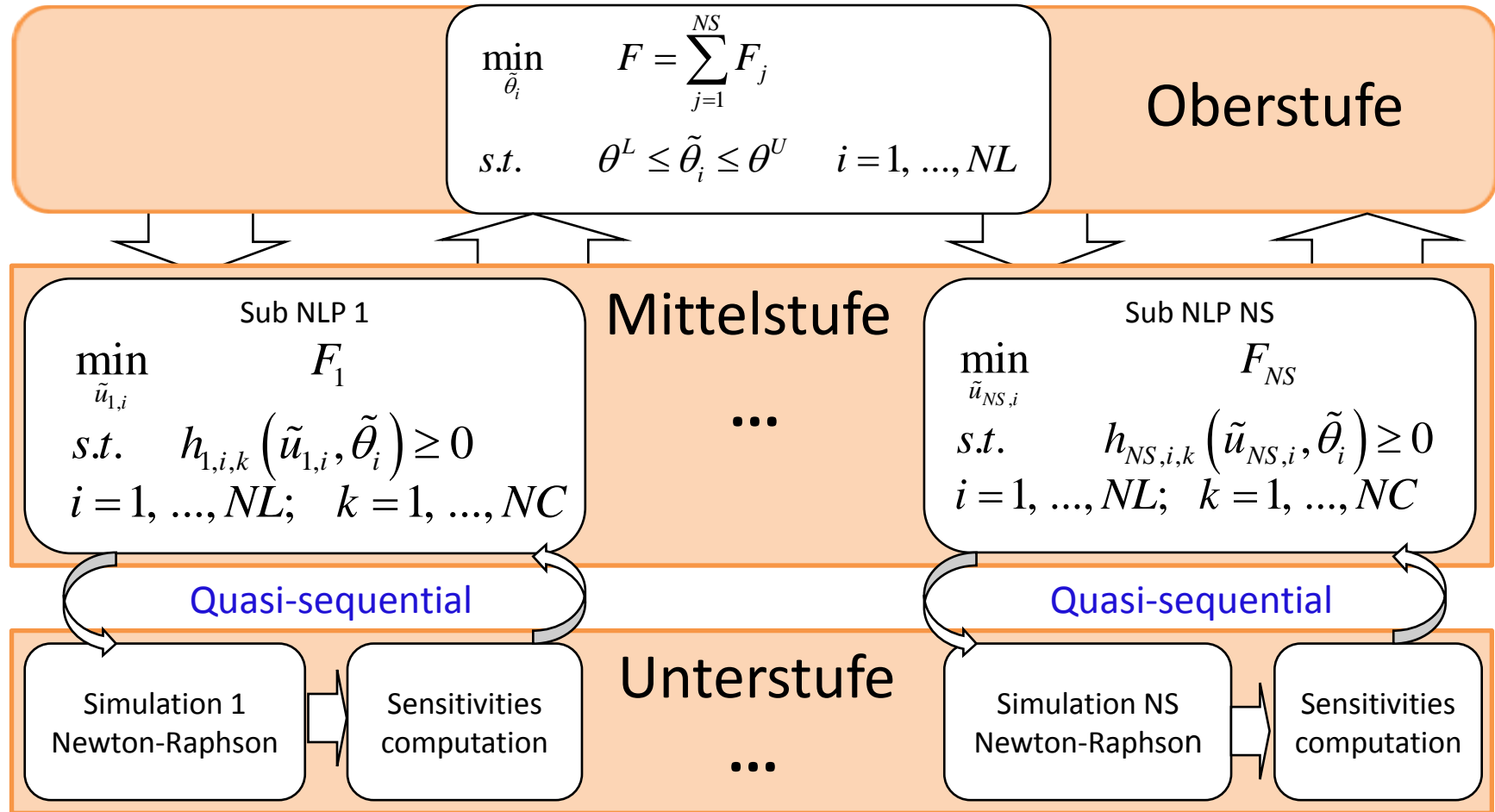
$$C_{\min} \leq C(v_i, h_i^x) \leq C_{\max}$$



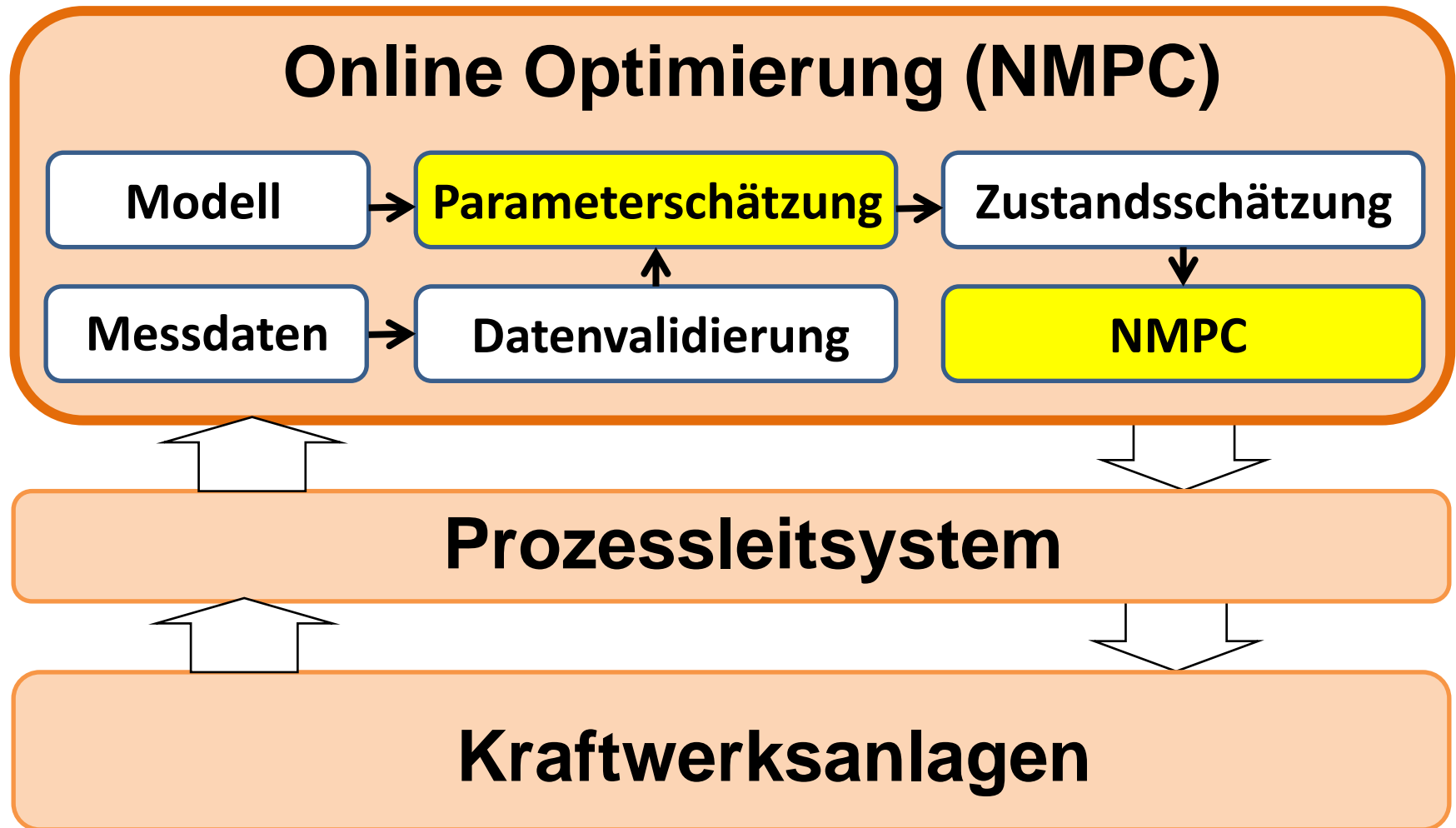
Kompetenzen SOP:

Parameteridentifikation anhand mehrerer Datenreihen

Vu & Li, *High Performance Computing*, 2012



Aufgabenstellung: Einteilung der Aufgaben



Aufgabenstellung: **Problemdefinition**

$$\min_{u(t), x(t), y(t), p} \left\{ J = \Phi(x_f, y_f, t_f, p) + \int_{t_0}^{t_f} L(x(t), y(t), u(t), \theta) dt \right\}$$

$$\text{s.t.} \quad \dot{x}(t) = f(x(t), y(t), u(t), t, \theta) \quad x(t_0) = x_0$$

$$0 = g(x(t), y(t), u(t), t, \theta) \quad t \in [t_0, t_f]$$

$$0 \leq h(x(t), y(t), u(t), t, \theta)$$

$$0 = r_e(x(t_i), y(t_i), \theta)$$

$$0 \leq r_i(x(t_i), y(t_i), \theta)$$

Anlagen:

- Struktur?
- Anlagendaten?
- Messdaten?
- Modell?

Variablen:

- Zustandsgrößen?
- Steuergrößen?
- Messgrößen?
- Parameter?

Funktionen:

- Zielfunktion?
- Diff. Gleichungen?
- Algebr. Gleichungen?

Arbeitspunkte:

1) Vorbereitung:

- Problemdefinition
- Modellierung
- Simulation
- Fallstudien

3) Codierung:

- JModelica
- Strukturierung
- Standardisierung
- Parallelisierung

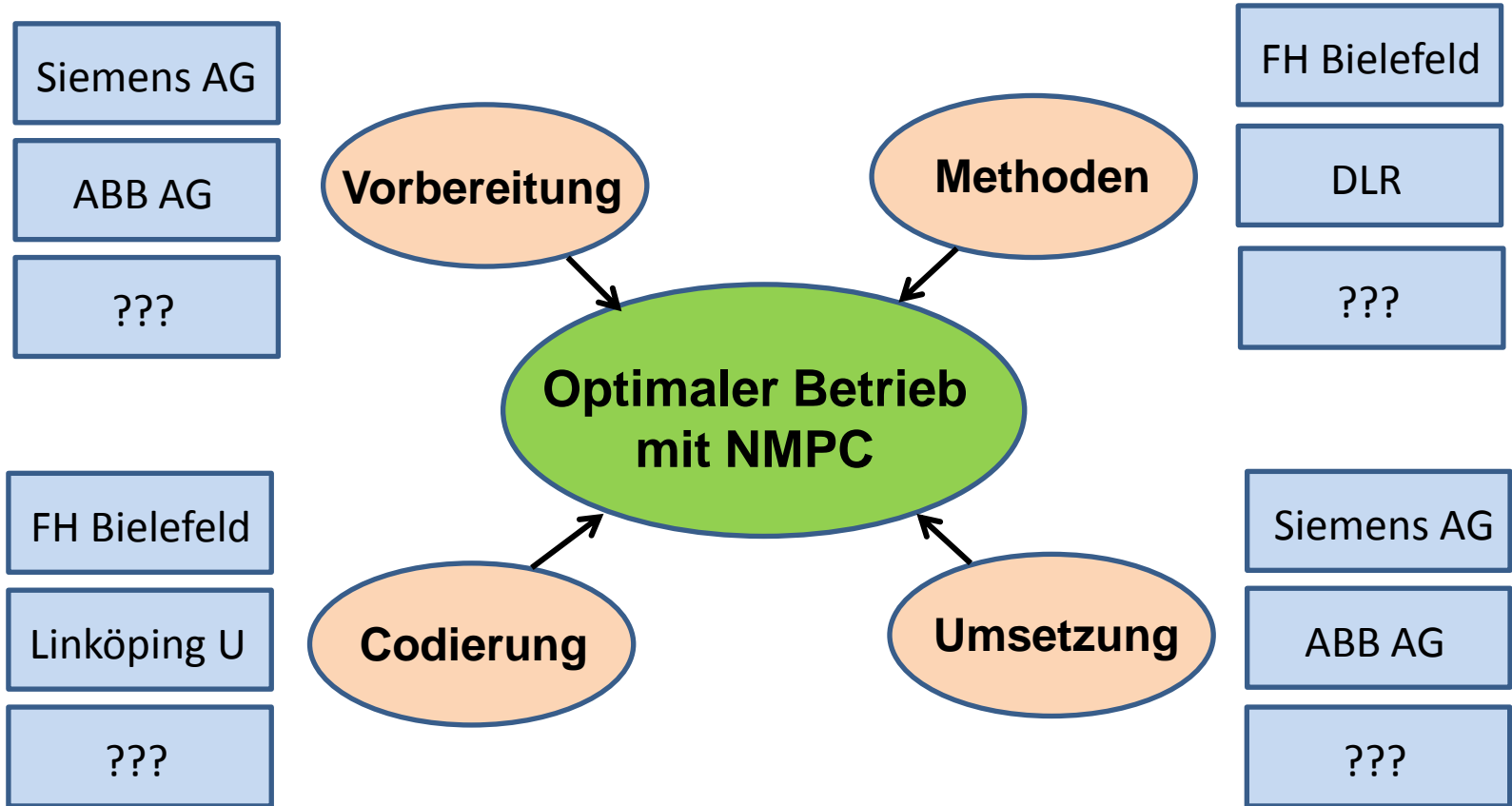
2) Methoden:

- Multiple shooting + collocation
- Adaptive Diskretisierung
- Parameteranpassung
- Robustheit + Stabilität

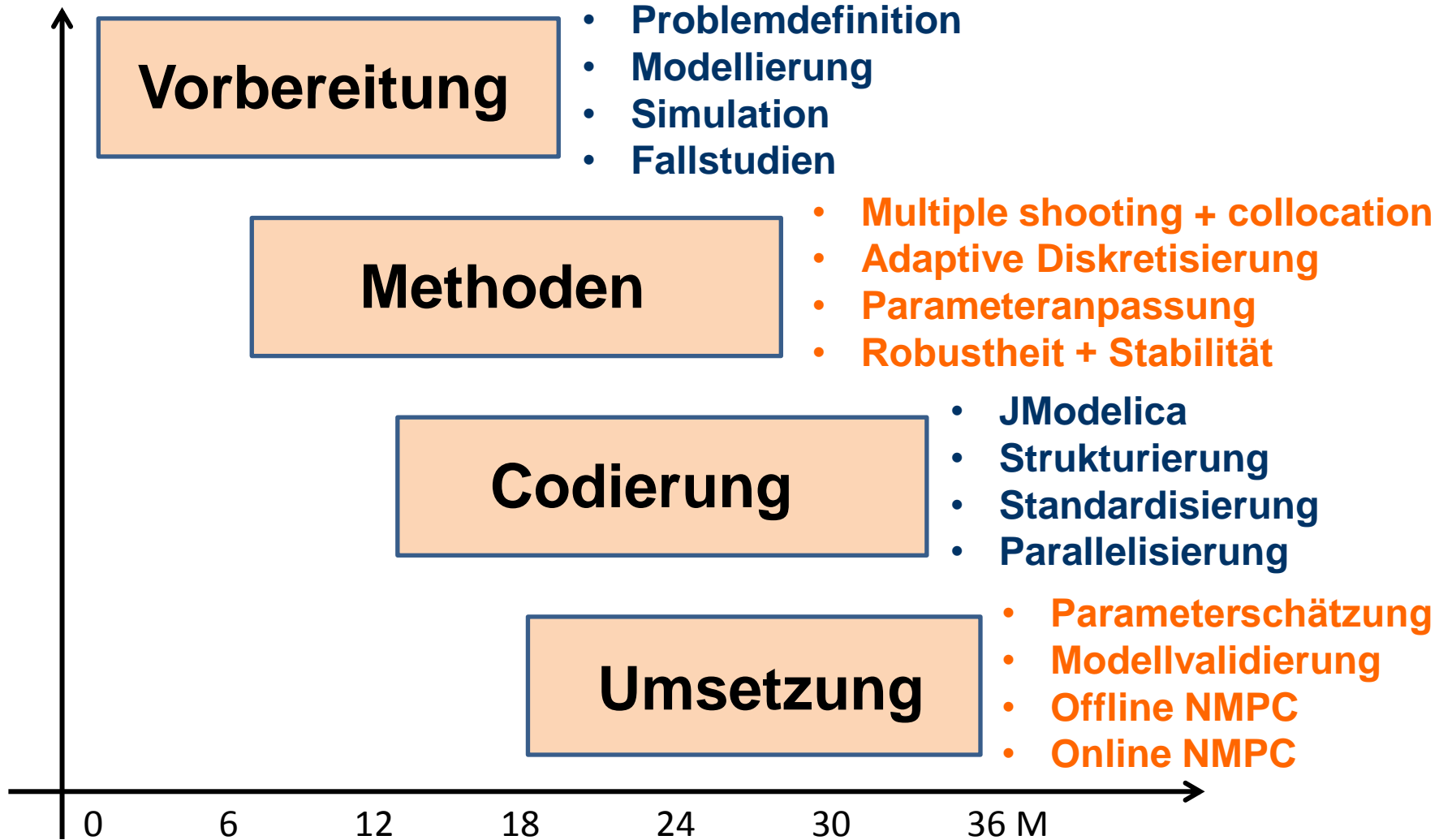
4) Umsetzung:

- Parameterschätzung
- Modellvalidierung
- Offline NMPC
- Online NMPC

Zusammenarbeit in MODRIO



Zeitplan:



Vielen Dank für Ihre Aufmerksamkeit!