



Institute for Design and Control of Mechatrical Systems

Robuste MPC Regelung des Rotflex Arms von Quanser

von:

Christian Zauner

Betreuer:

Stephan Stadlbauer

Harald Kirchsteiger

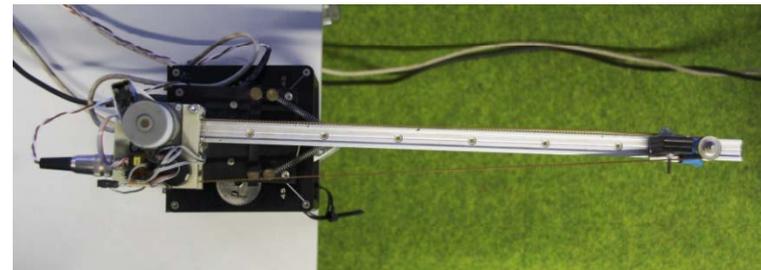
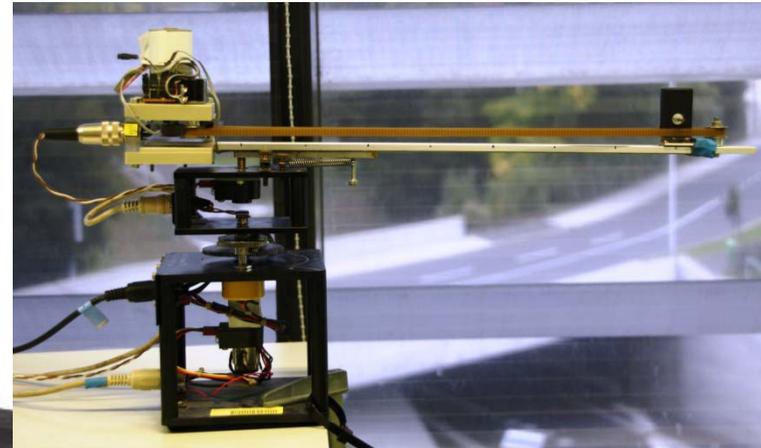


- Modell und Problemstellung
- Implementierungen mit Ergebnissen
 - Identifikation
 - Konventioneller MPC
 - Tube-Based Robust MPC
- Vergleich
- Zusammenfassung

Modell und Problemstellung



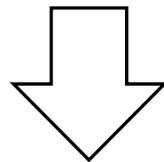
- Quanser SRV-02
- Rotflex Aufsatz
- 3 Freiheitsgrade
- 2 DC-Motoren
- 2 Winkelencoder



Modell und Problemstellung



- Schwerpunkt des Arms variabel
- Modell Prädiktive Regelung



- Robuste Modell Prädiktive Regelung



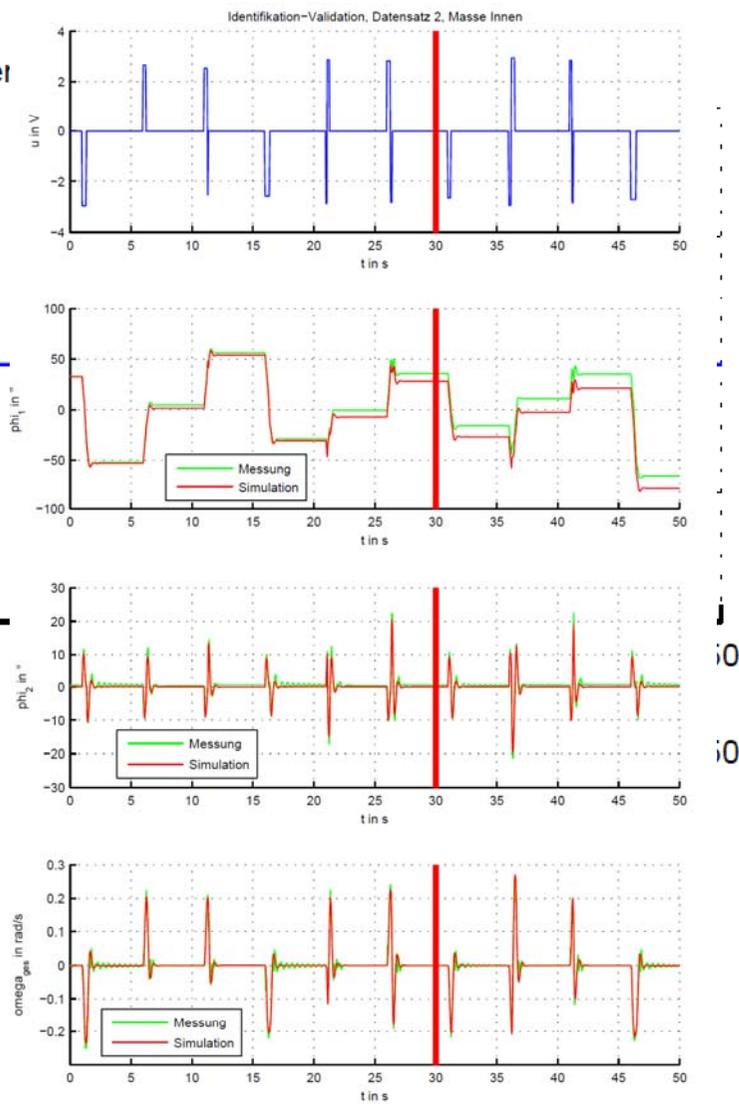
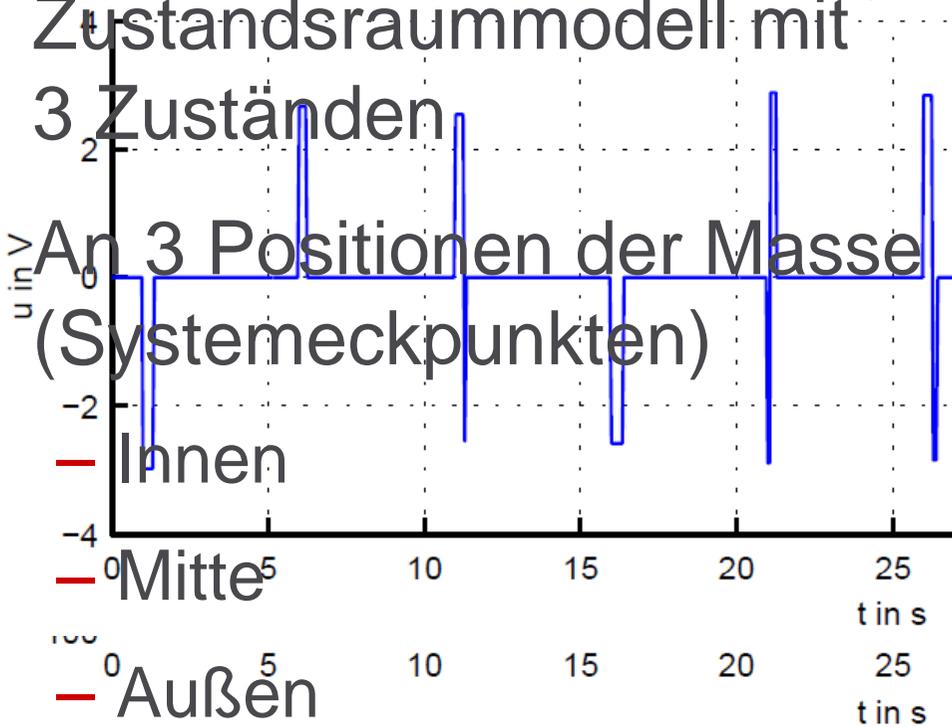
- Verbesserung und Reparatur des Modells
- Identifikation
- Auslegung eines MPC-Reglers
- Auslegung eines robusten MPC-Reglers
- Implementierung in Simulink und dSpace
- Vergleich

Identifikation



- Zustandsraummodell mit 3 Zuständen
- An 3 Positionen der Masse (Systemeckpunkten)
 - Innen
 - Mitte
 - Außen

Identifikation-Validation, Daten



Konventioneller MPC



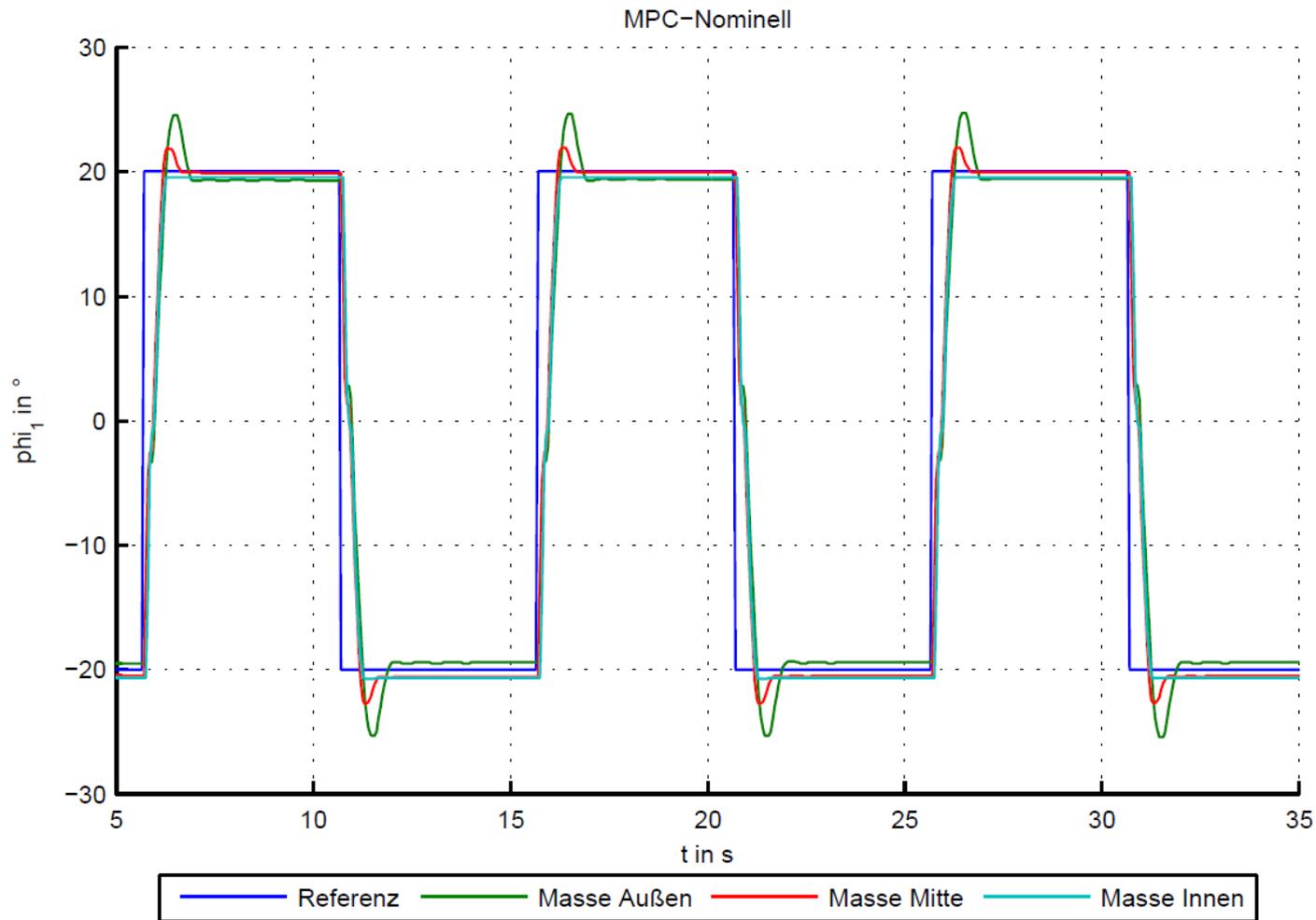
- Kontrollhorizont und Prädiktionshorizont: 6
- Auf Basis verschiedener Systeme
 - Nominell
 - Masse Innen
 - Masse Mitte
 - Masse Außen

$$\bar{x}^+ = \bar{A}x + \bar{B}u$$

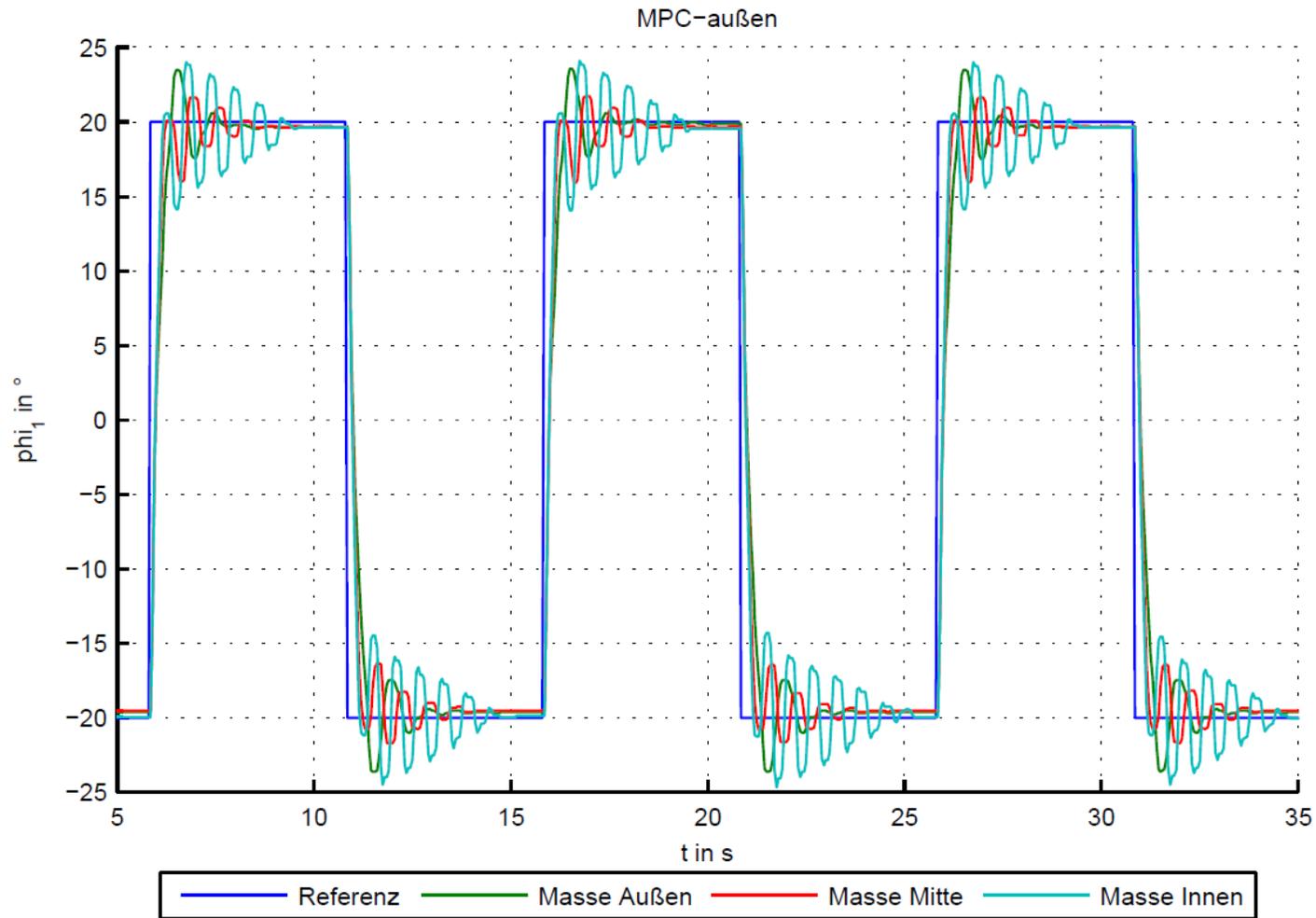
$$\bar{x} = \frac{1}{2} (\bar{x}_{\text{Innen}} + \bar{x}_{\text{Mitte}})$$

$$\bar{x} = \frac{1}{2} (\bar{x}_{\text{Mitte}} + \bar{x}_{\text{Außen}})$$

Konventioneller MPC



Konventioneller MPC



Tube-Based Robust MPC



allgemein Störgröße im Zustandsmodell: $x^+ = Ax + Bv + w$

mit $w \in W$, $v \in V$, $x \in X$

Optimierungsproblem



$$(\mathbf{x}^*, \mathbf{u}^*) = \arg \min_{\mathbf{x}_0, \mathbf{u}} \left(\sum_{k=0}^{N-1} (\mathbf{x}_k^T \mathbf{Q} \mathbf{x}_k + \mathbf{u}_k^T \mathbf{R} \mathbf{u}_k) + \mathbf{x}_N^T \mathbf{P} \mathbf{x}_N \right)$$

$$\text{s.t. } \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A} \mathbf{x}_k + \mathbf{B} \mathbf{u}_k$$

$$\mathbf{x}_0 \in \{\mathbf{x}\} \oplus (-\mathbf{z})$$

$$\mathbf{x}_k \in \bar{\mathbf{x}} \quad \forall k \in [0, N-1]$$

$$\mathbf{u}_k \in \bar{\mathbf{u}}_k$$

$$\mathbf{u}_k \in \bar{\mathbf{u}} \quad \forall k \in [0, N-1]$$

- Lösung online mittels qpOASES

Erweiterung für Tracking



- Weitere Optimierungsvariable θ
(virtuelle Referenz)
- Gewichtung der Abweichung von der Referenz in der Kostenfunktion
- Berechnung von \mathbb{X}_f in einem erweiterten Zustandsraum x^e

Modellierung der Modellunsicherheit



- 2 Systeme an Extrempunkten
- Arithmetisches Mittel der beiden Systeme

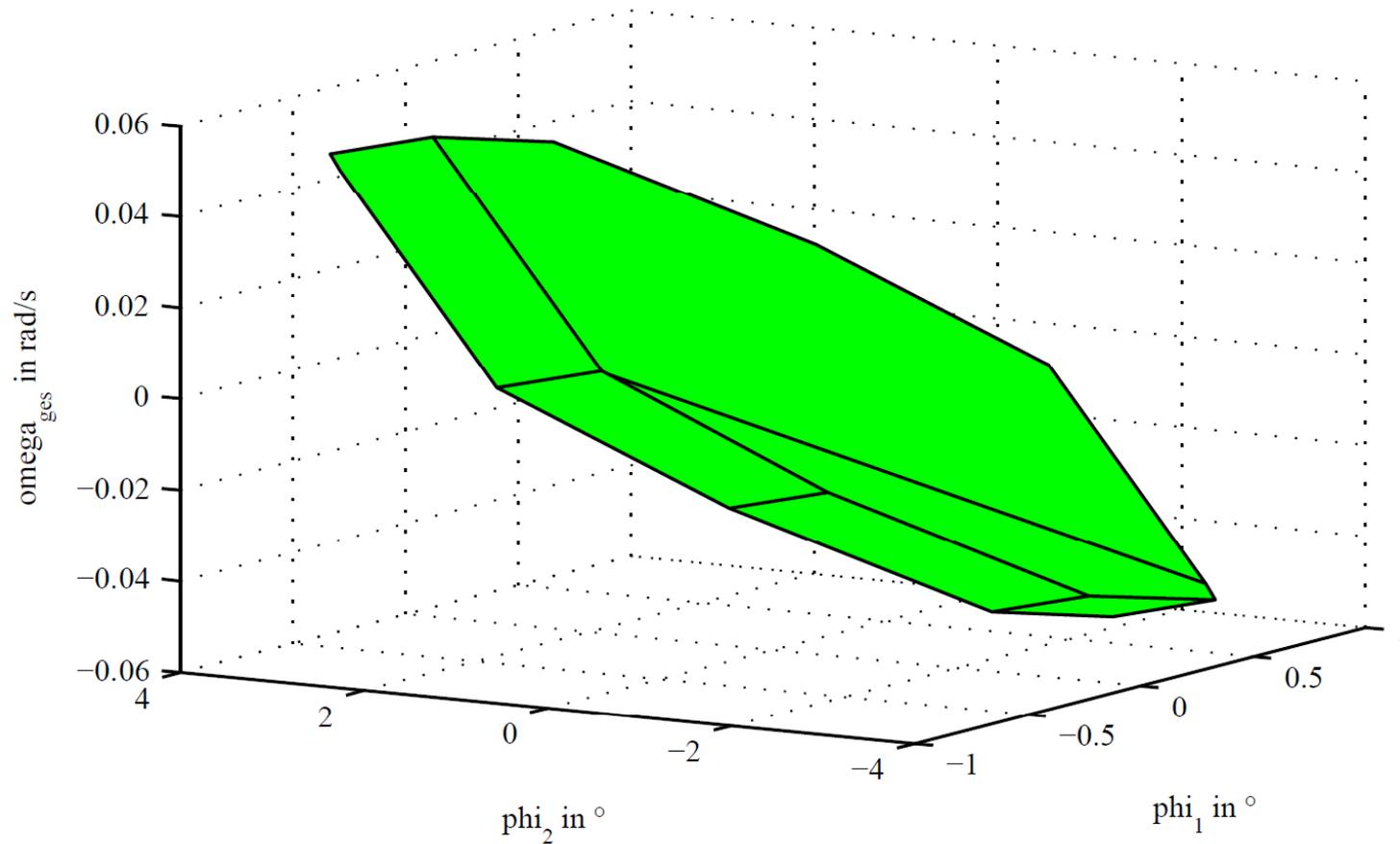
$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2}{2} = \frac{x_{1,1} + x_{1,2}}{2} + \frac{x_{2,1} + x_{2,2}}{2} + \dots$$

$$\bar{x} = \frac{(x_1 - x_{1,1}) + (x_1 - x_{1,2})}{2} + \frac{(x_2 - x_{2,1}) + (x_2 - x_{2,2})}{2} + \dots$$

$$[x_1, x_2] \in \{[x_{1,1}, x_{1,2}], [x_{2,1}, x_{2,2}]\}$$

$$x_1 \in [x_{1,1}, x_{1,2}] \quad x_2 \in [x_{2,1}, x_{2,2}]$$

Modellierung der Modellunsicherheit



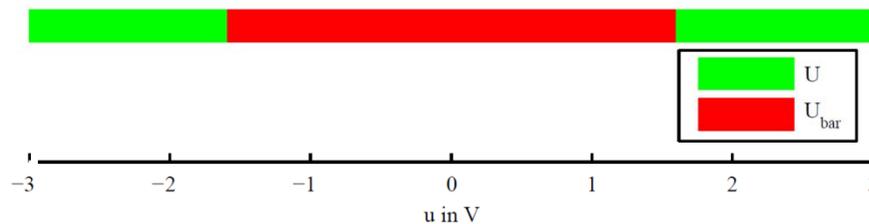
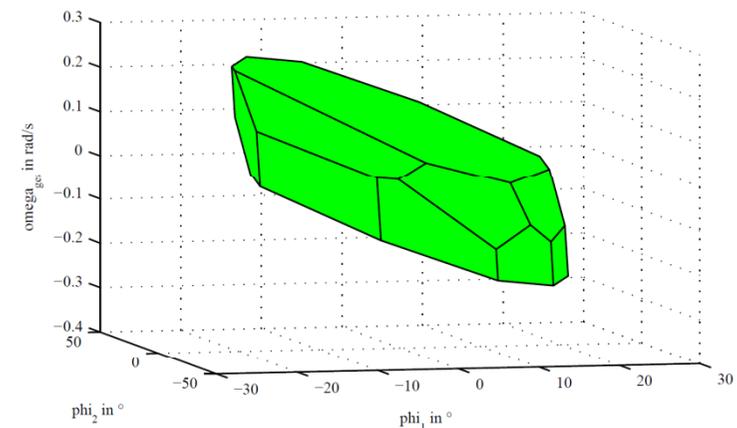


Tube-Based RMPC

- Beschränkungen \mathbb{X} und \mathbb{U}
- Berechnung von K
- RPI-Menge \mathcal{E}
- Gewichte Q, R, P, T
- Verschärfte Beschränkungen
- Abschlussbeschränkung

$$\mathbb{U} = \left\{ u \in \mathbb{R}^m \mid \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \end{bmatrix} u \leq \begin{bmatrix} 3V \\ 3V \end{bmatrix} \right\}$$

$$\mathbb{X} = \left\{ \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \omega_{ges} \end{bmatrix} \in \mathbb{R}^m \mid \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \omega_{ges} \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} 60^\circ \\ 30^\circ \\ 1.5 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \\ -60^\circ \\ -30^\circ \\ -1.5 \frac{\text{rad}}{\text{s}} \end{bmatrix} \right\}$$

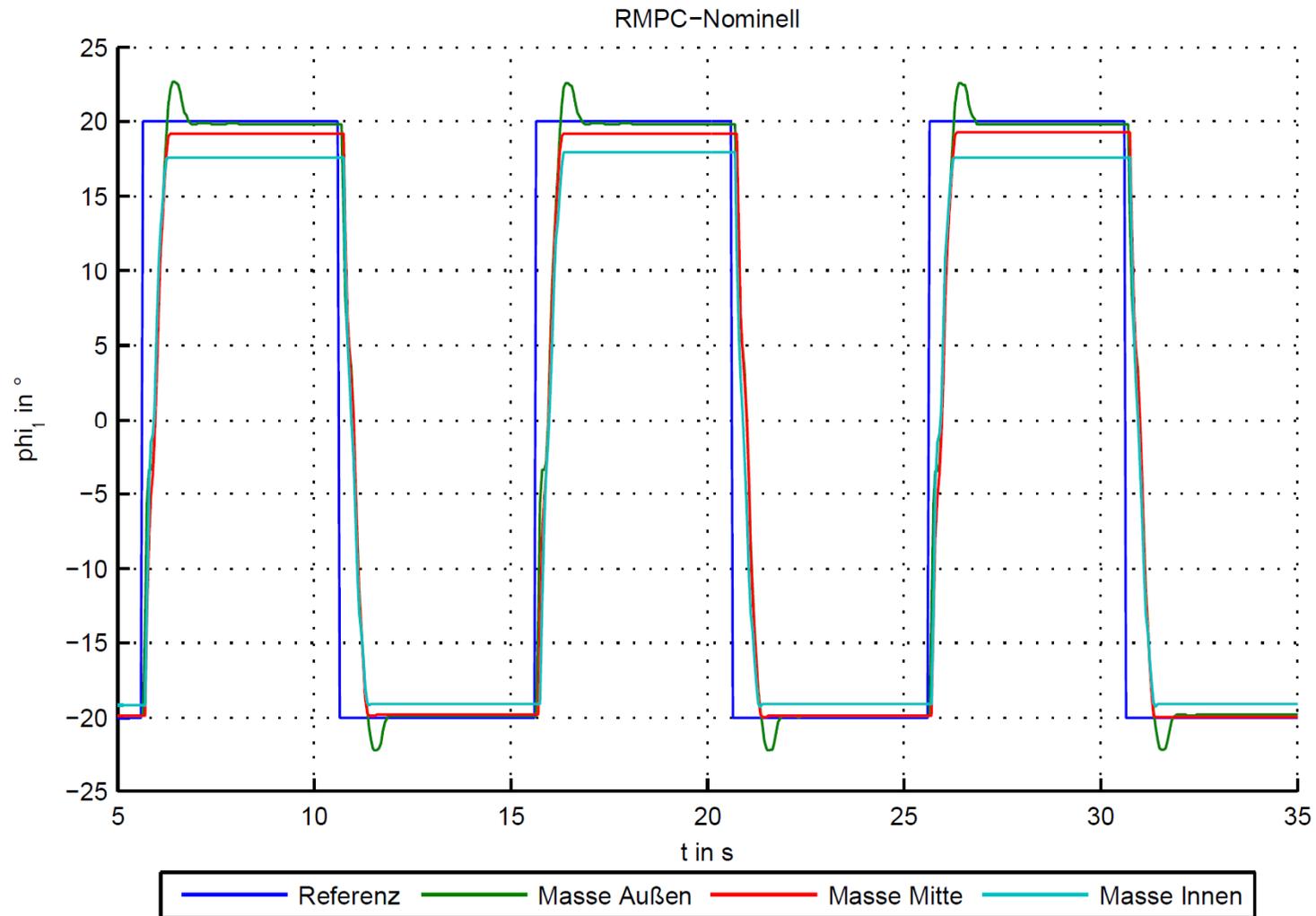


Eigenschaften Tube-Based RMPC

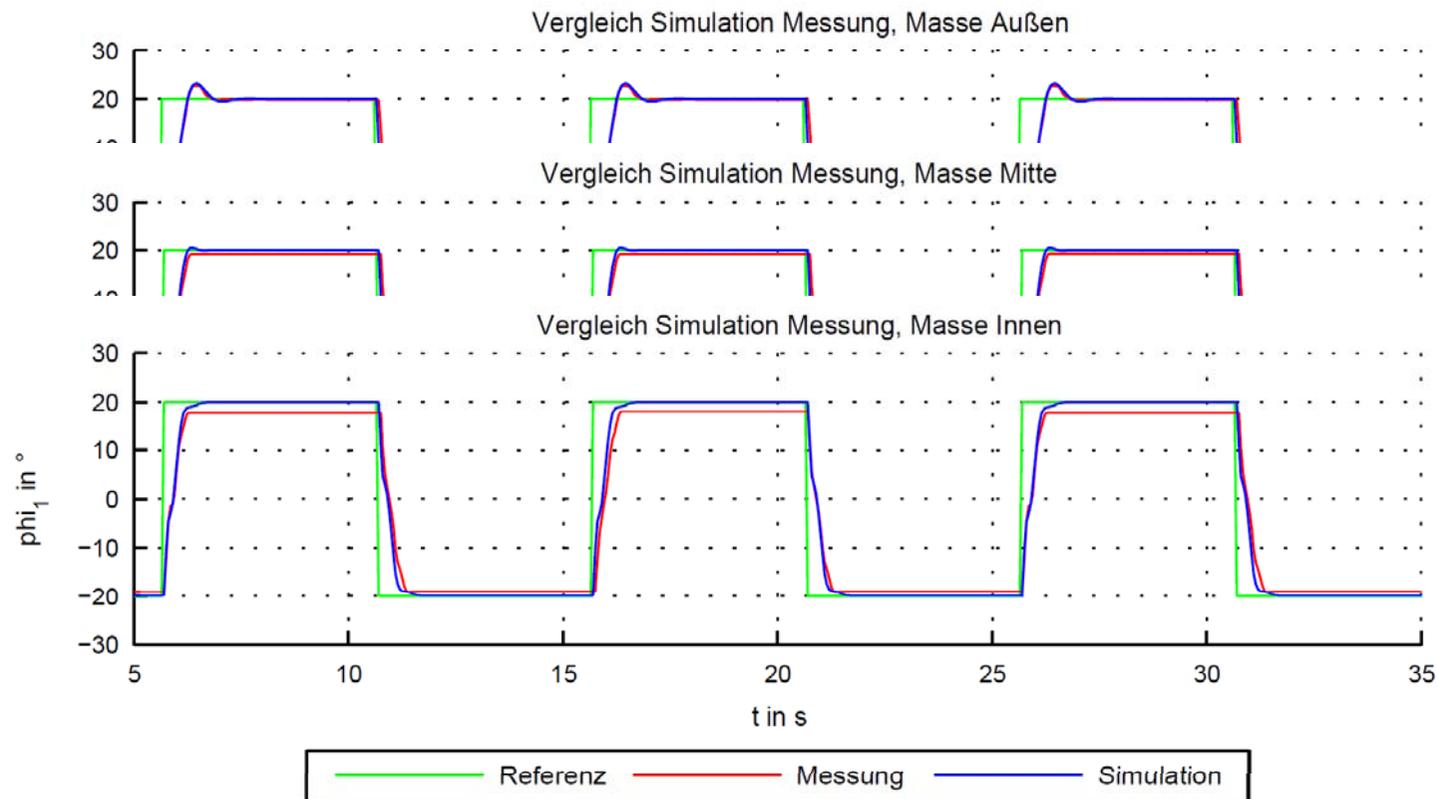


- Relativ geringer Online-Rechenaufwand
- Lösung eines QPs
- Durchaus aufwändige Berechnungen Offline:
 - \mathcal{W} (Fehler durch Modellunsicherheit)
 - K (Zustandsrückführungsvektor)
 - RPI-Menge ε

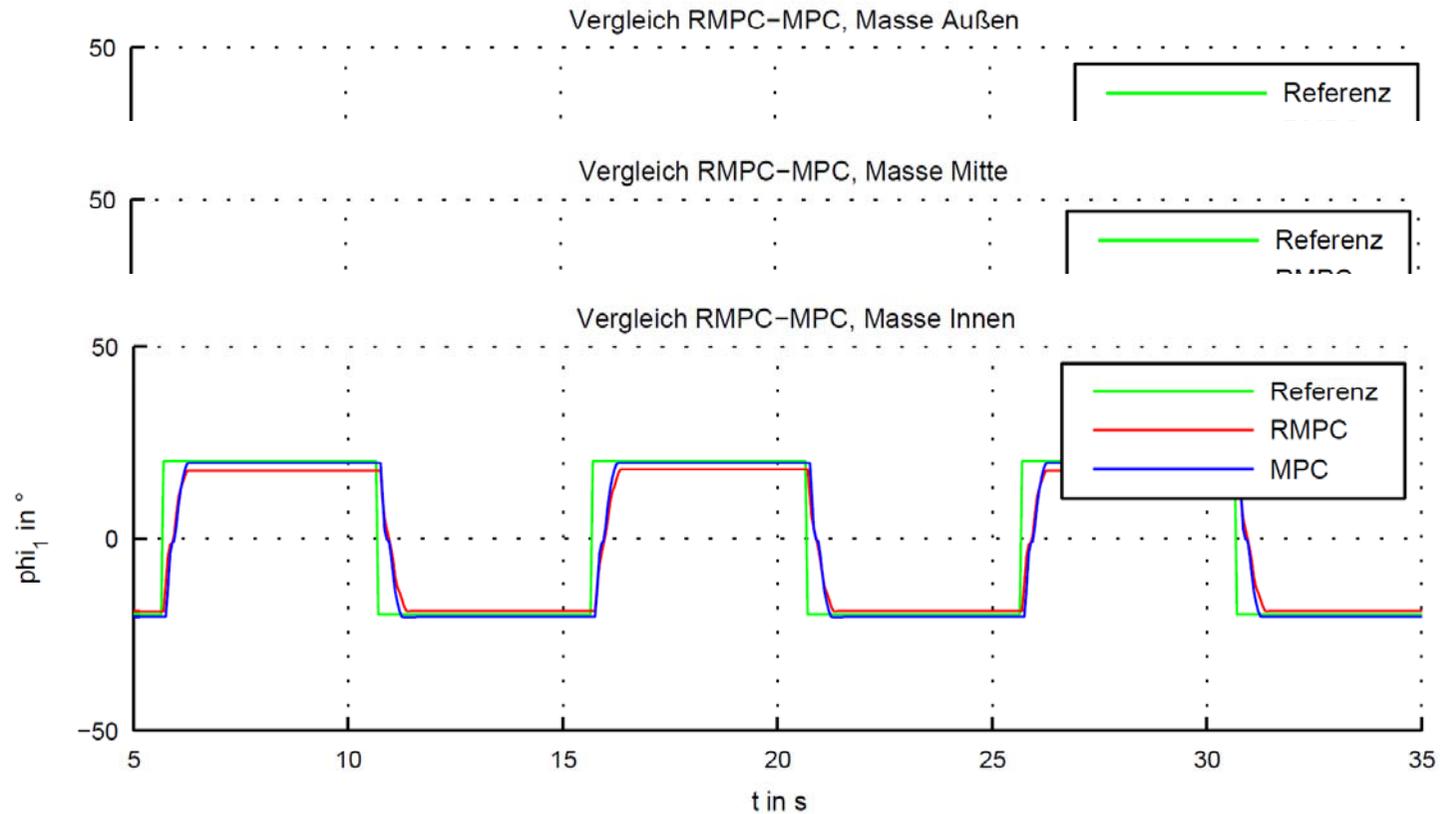
Tube-Based RMPC Messung



Vergleich Simulation-Messung



Vergleich RMPC-MPC



Zusammenfassung Ergebnisse

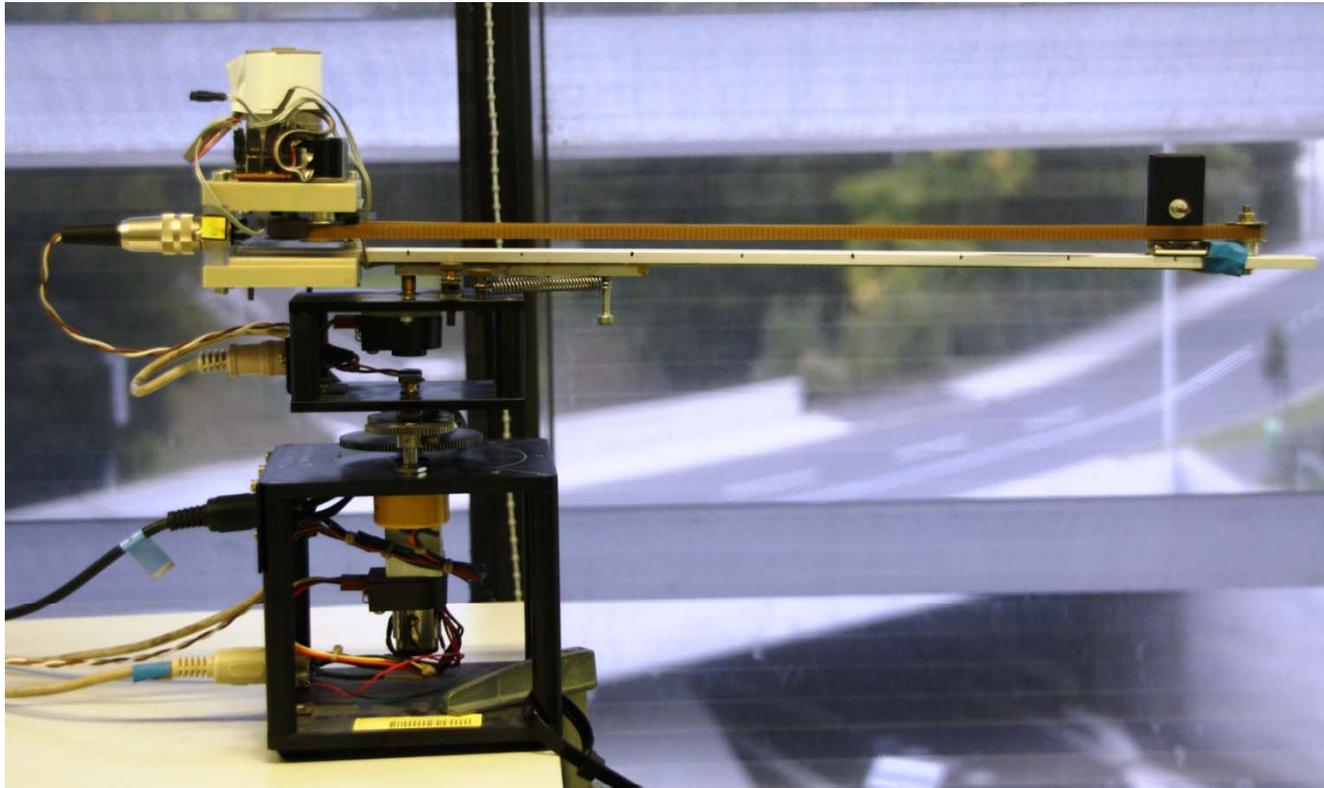


- Beschränkung der Sprunghöhe wegen
 - Online Berechnungsaufwand
- Bleibende Regelabweichung wegen
 - Haftreibung
 - Wahl der Gewichtung der Regelabweichung



- Verwendung eines leistungsstärkeren Prozessors
- Überarbeitung der Implementierung in Simulink (Geschwindigkeitsoptimierung)

Quanser Regelung



Danke für Ihre Aufmerksamkeit!