

Modellierung eines dynamischen Motorprüfstands

Modellbildung
Identifikation
Simulink-Modell
Optimale Regelung

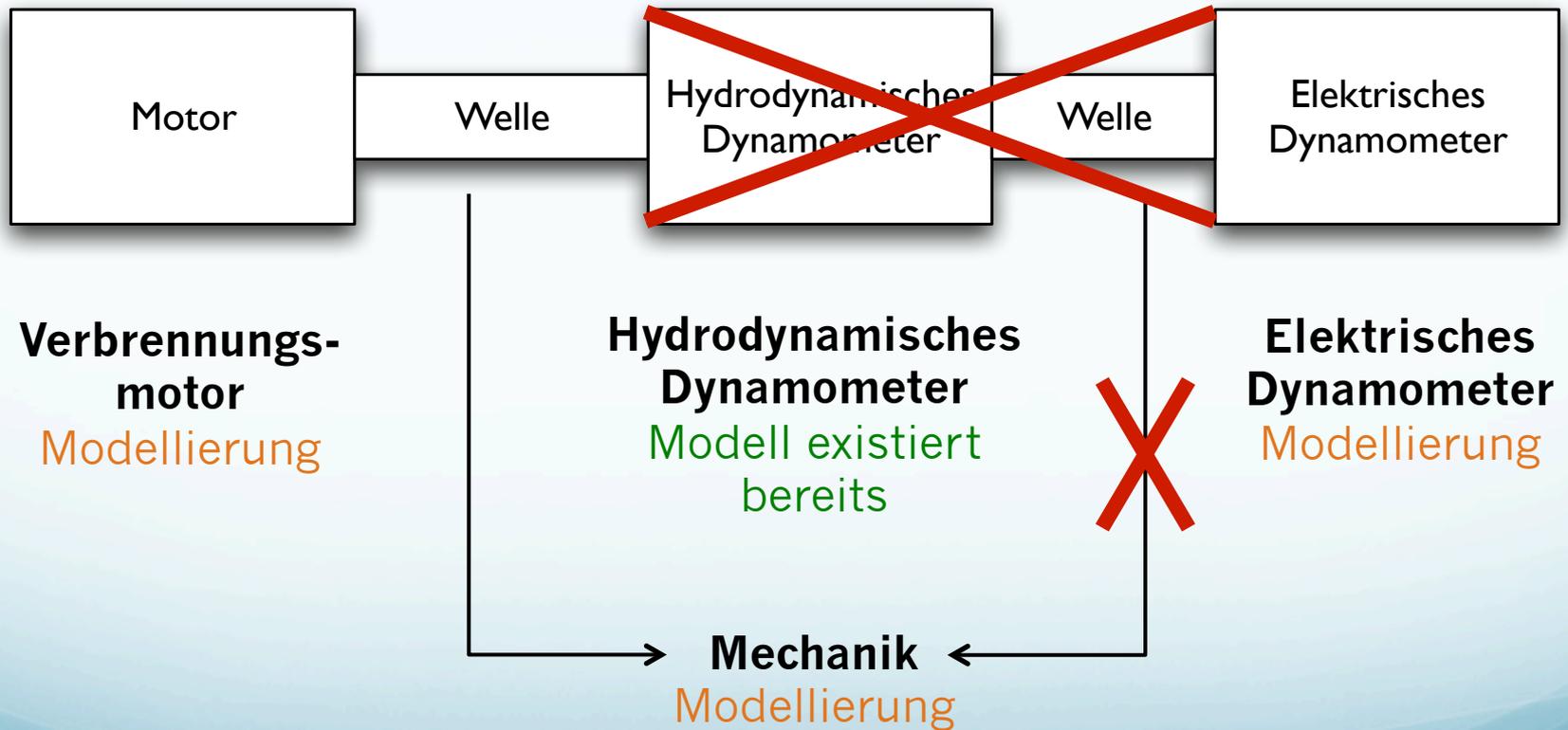
Josef Blumenschein

Patrick Schrangl

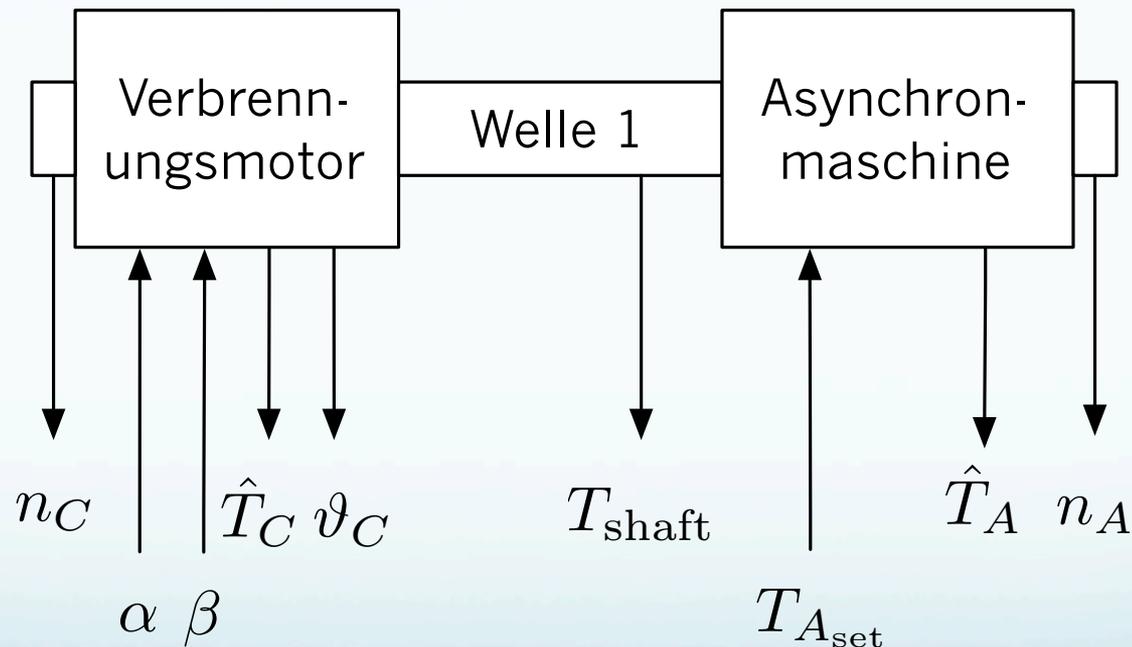
Aufgaben

- Modellbildung und Identifikation
 - ✓ Verbrennungsmotor
 - ✓ ASM
 - ✓ Mechanik
- Simulink-Modell
 - ✓ Verbrennungsmaschine
 - ✓ ASM
 - ✓ Mechanik
- Optimale Regelung
 - ✓ PI-Regler
 - ✓ LQR mit Kalman

Motorprüfstand



Aufbau Prüfstand



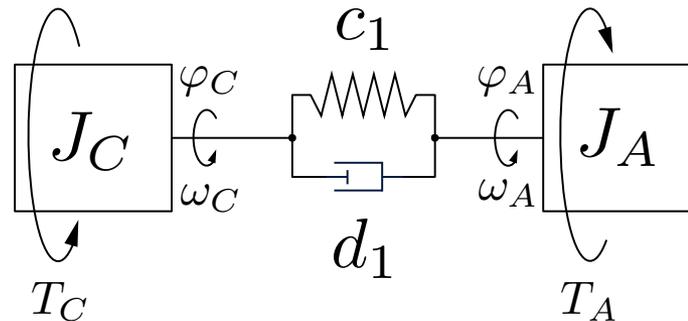
Gewählte Modellstruktur

- Prüfstandsmechanik
 - Lineares Modell eines 2-Massen-Schwinger
- Verbrennungsmotor
 - Erweitertes Hammerstein-System
 - Nichtlineares statisches Kennfeld +
 - Lineares arbeitspunktabhängiges dynamisches System
- Elektr. Maschine
 - Berücksichtigung der Massenträgheit der ASM
 - Dynamik als TP 2. Ordnung

Modellierung der Mechanik



- Verbindung zwischen ASM und Verbrennungsmotor



- Modellierung als Zweimassenschwinger

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\varphi}_C - \dot{\varphi}_A \\ \dot{\omega}_C \\ \dot{\omega}_A \end{bmatrix}}_{\dot{x}(t)} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ -\frac{c_1}{J_C} & -\frac{d_1}{J_C} & \frac{d_1}{J_C} \\ \frac{c_1}{J_A} & \frac{d_1}{J_A} & -\frac{d_1}{J_A} \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} \varphi_C - \varphi_A \\ \omega_C \\ \omega_A \end{bmatrix}}_{x(t)} + \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{J_C} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J_A} \end{bmatrix}}_B \underbrace{\begin{bmatrix} T_C \\ T_A \end{bmatrix}}_{u(t)}$$

$$y = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}}_C \underbrace{\begin{bmatrix} \varphi_C - \varphi_A \\ \omega_C \\ \omega_A \end{bmatrix}}_{x(t)}$$

Modellierung der Mechanik

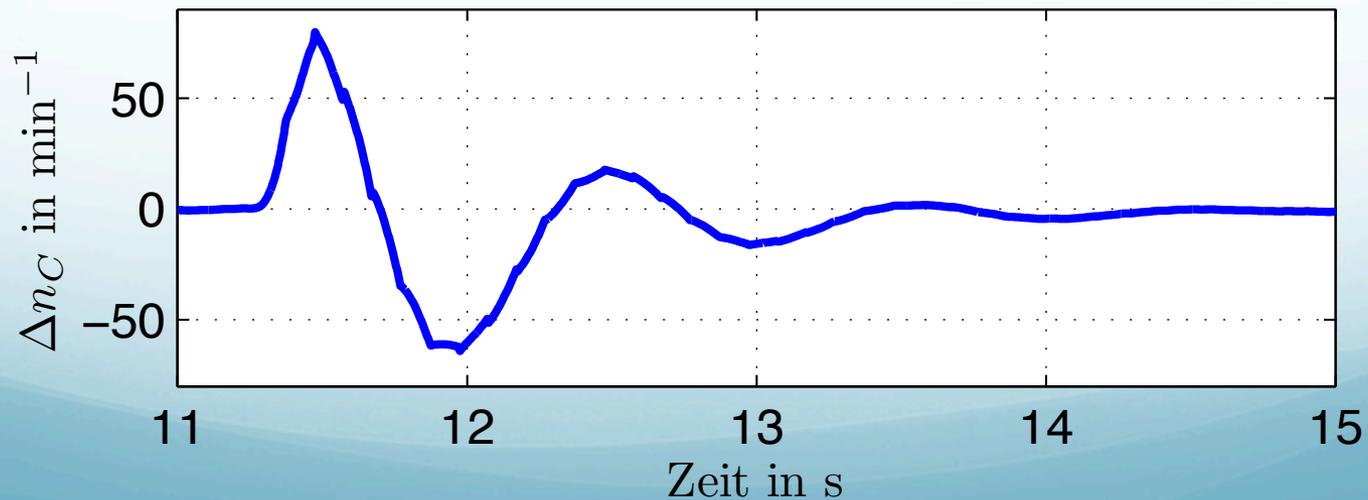
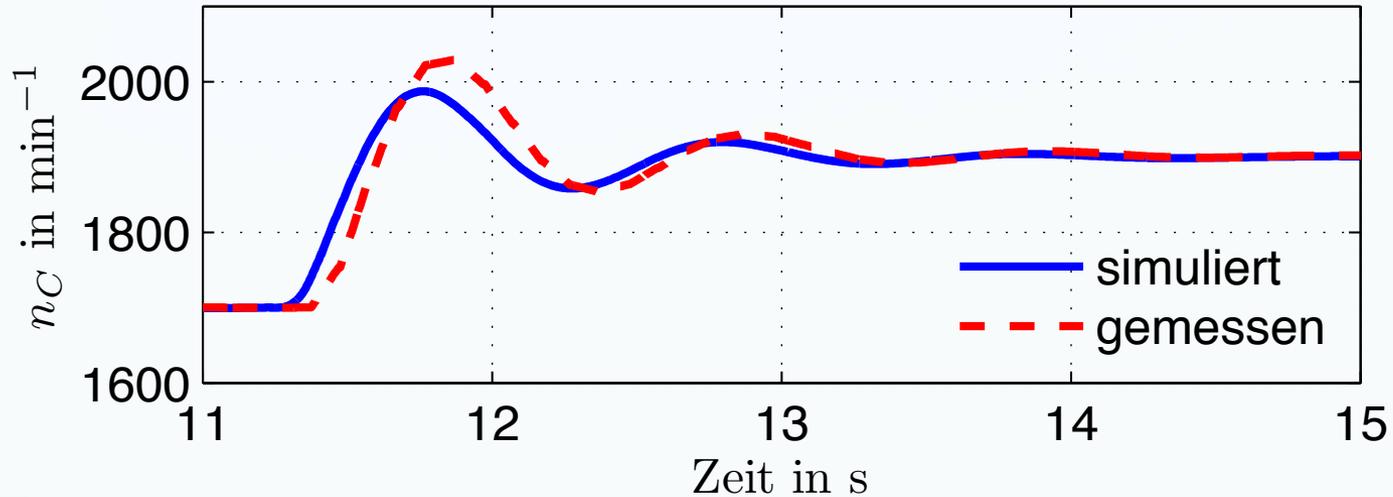


- Parameter des Models ermitteln
 - Massenträgheiten und Federkonstante aus Datenblättern J_A, J_C, c_1
 - Dämpfung in Datenblättern nicht angegeben d_1
- Bestimmung der Dämpfung aus der identifizierten Übertragungsfunktion

$$\frac{\omega_C(s)}{T_A(s)} = - \frac{d_1 s + c_1}{(s^3 J_A + d_1 s^2 + c_1 s) J_C + (d_1 s^2 + c_1 s) J_A}$$

- Optimierung der Parameter mit Matlab

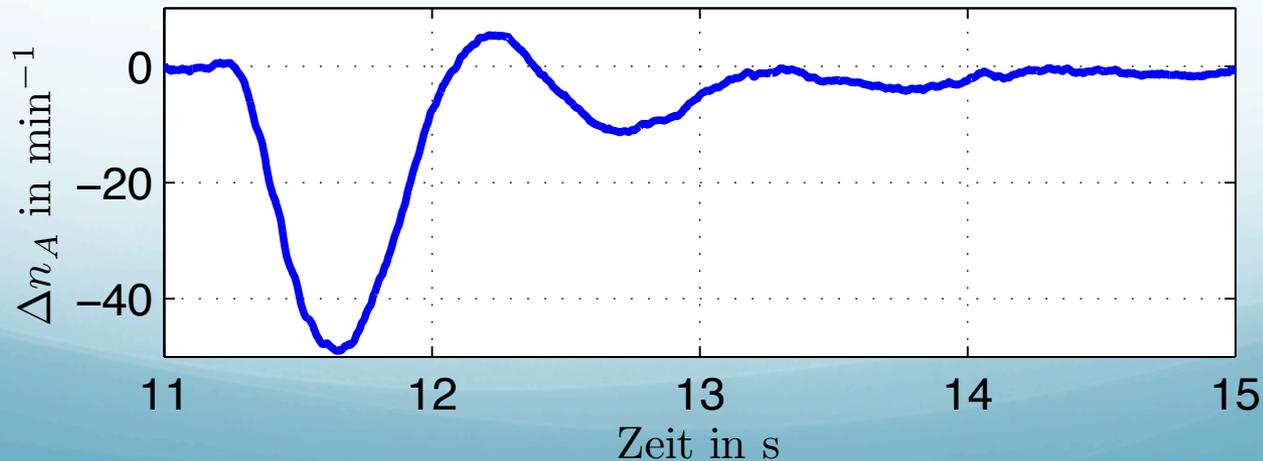
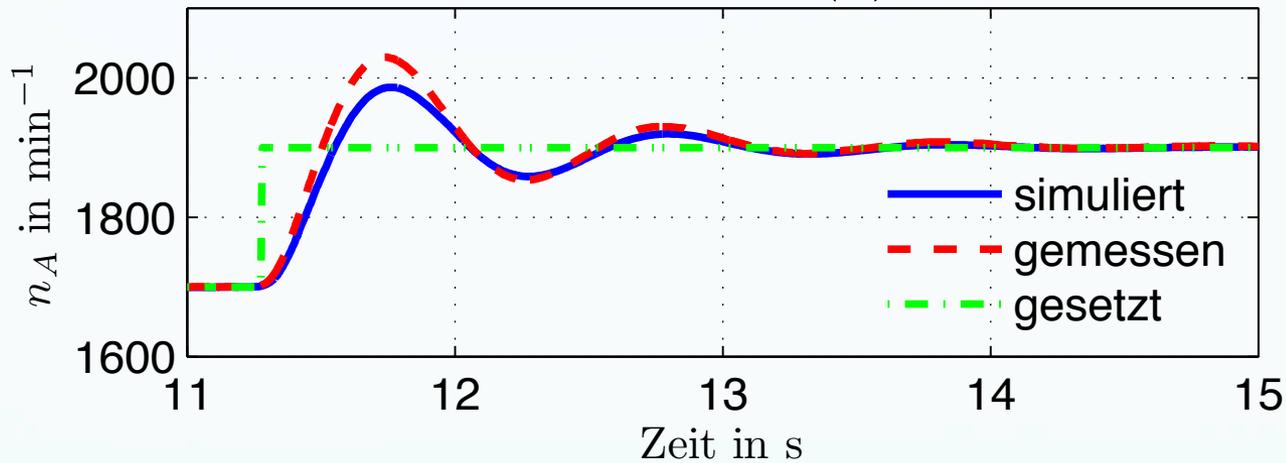
Modellierung der Mechanik



Modellierung der Mechanik



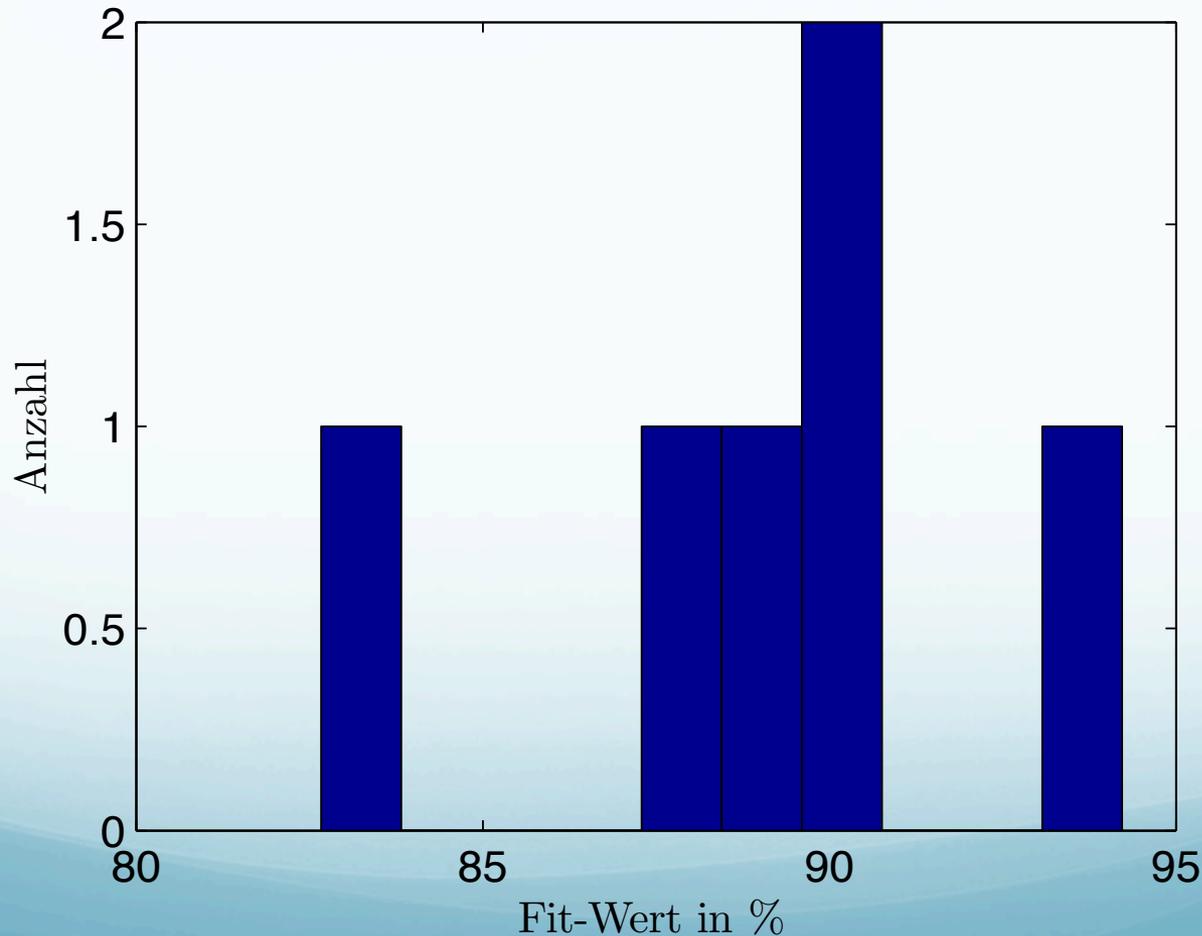
- Validation der Mechanik: $\frac{\omega_A(s)}{T_A(s)}$



Modellierung der Mechanik

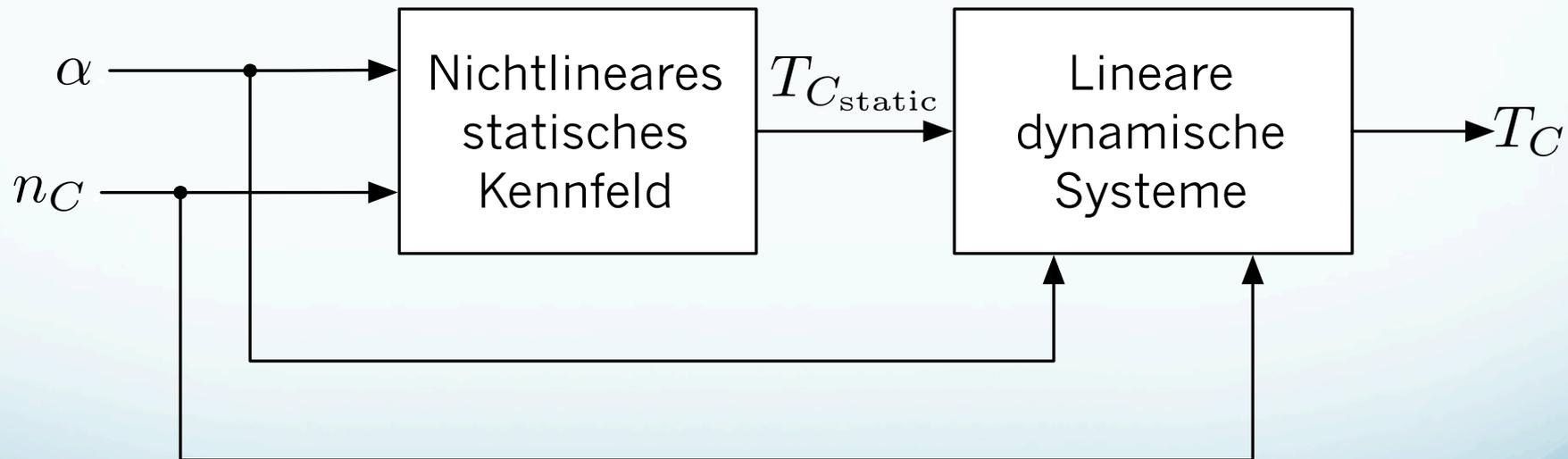


- Lineare Parameter der Mechanik:



Modellierung der VKM

- Modellierung über ein erweitertes Hammerstein System

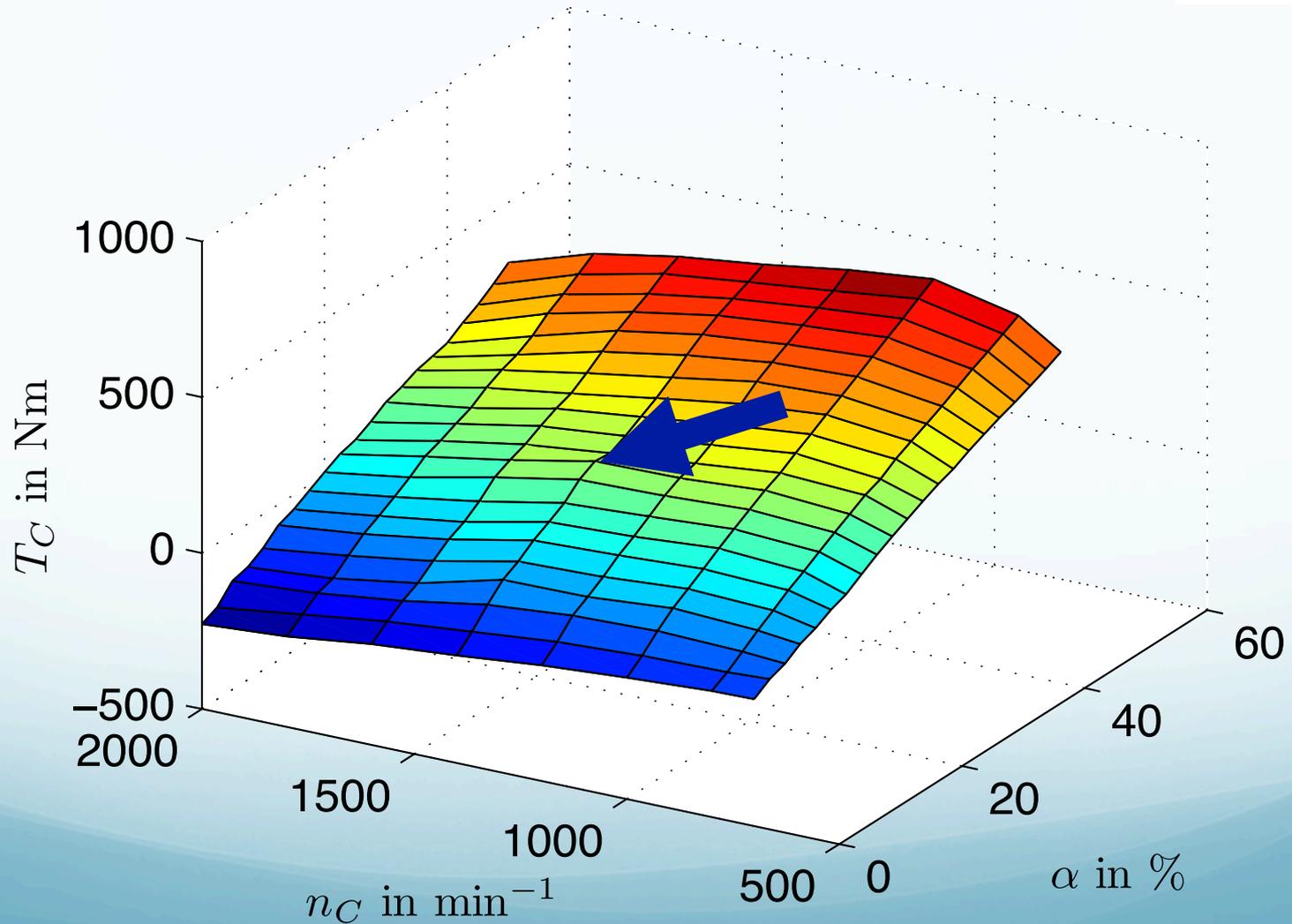


Statisches Kennfeld der VKM

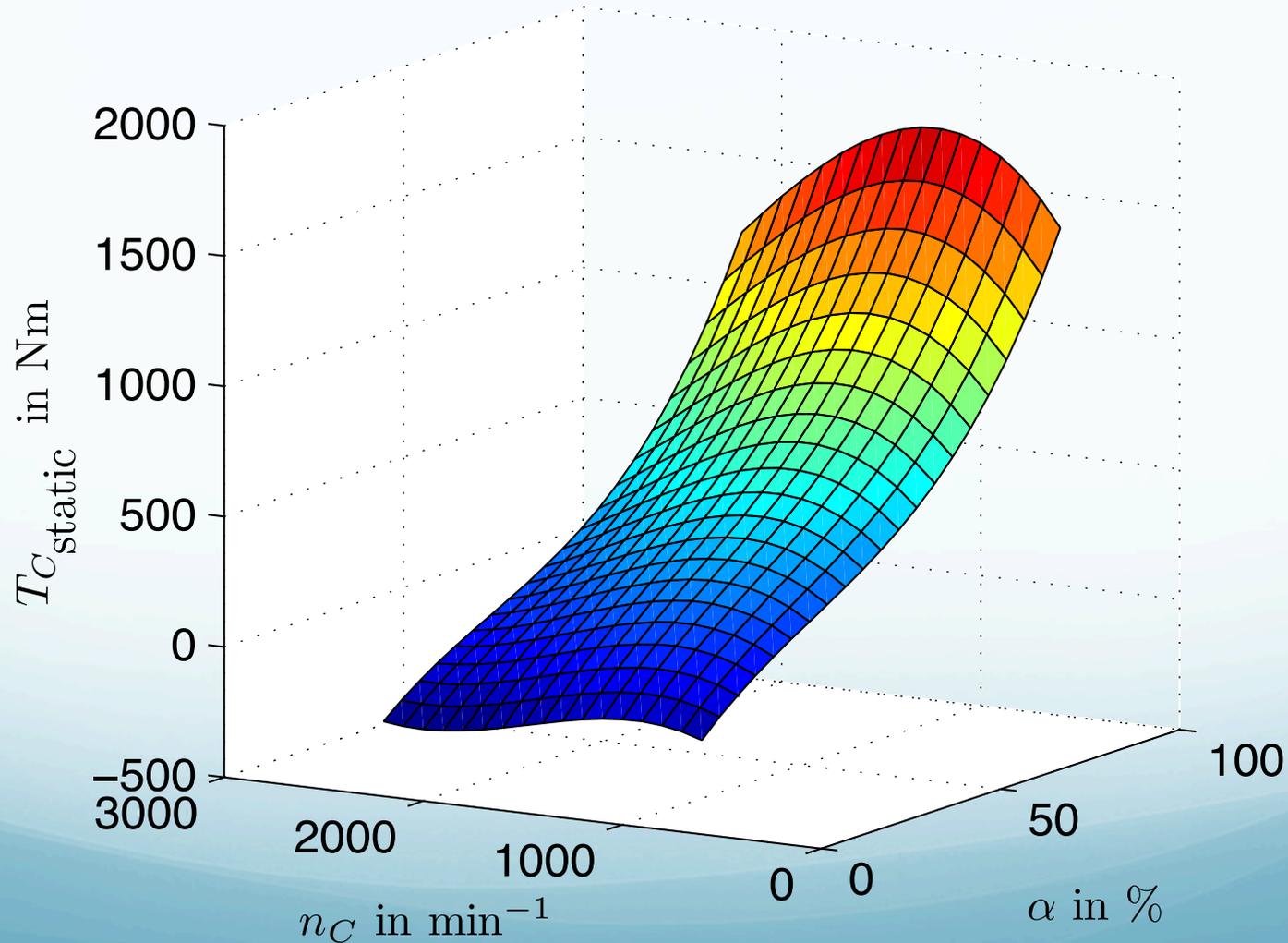


- Dynamik der Welle kann unberücksichtigt bleiben
- Bei verschiedenen Drehzahlen und Gaspedalstellungen (Rampe) statisches Moment gemessen
- Nach Filterung statische Map erstellt

Statisches Kennfeld der VKM



Statisches Kennfeld der VKM

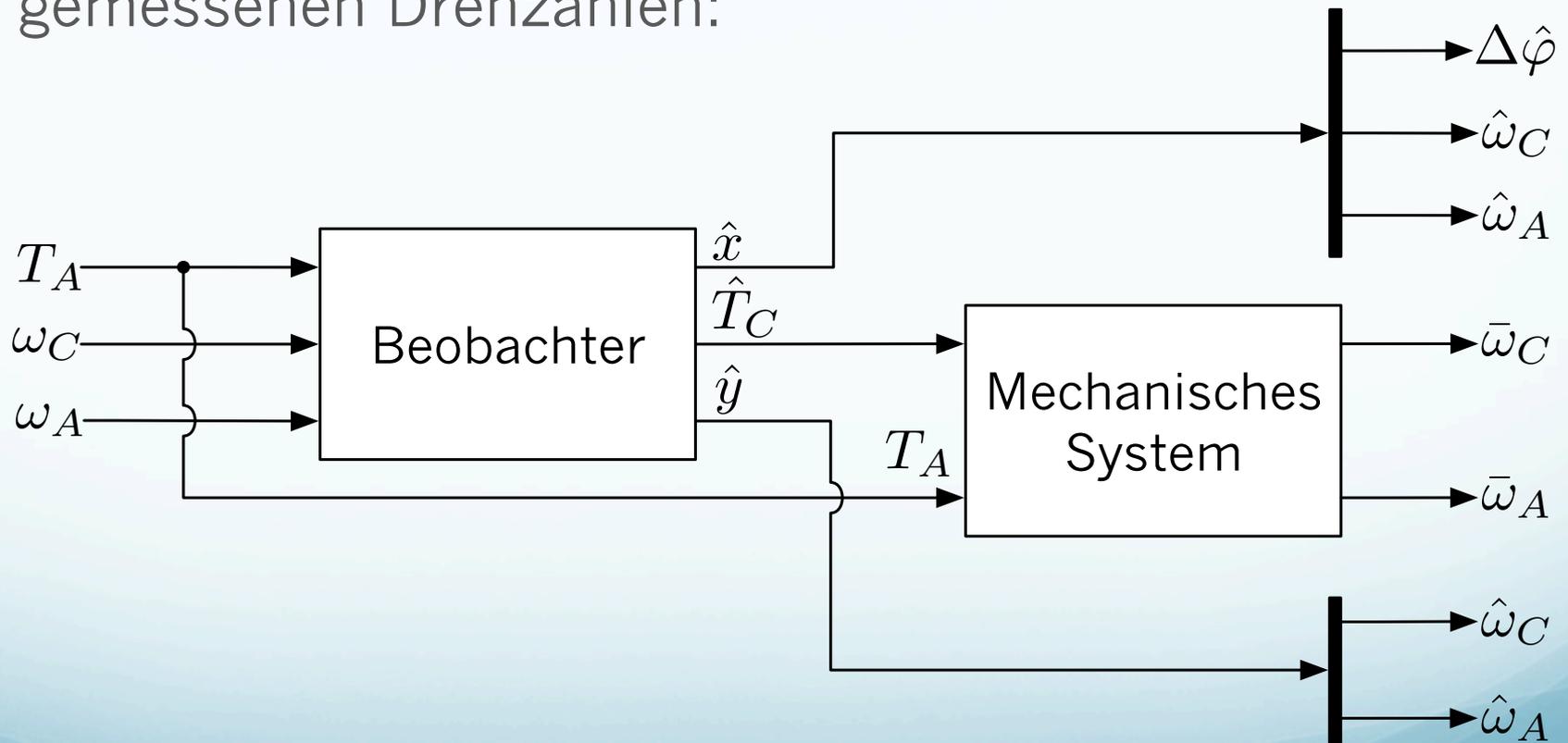


Dynamik der VKM

- Motormoment nicht direkt messbar, darum Identifikation mit dem geschätzten Moment
- Auslegung eines Beobachters für den nicht messbaren Eingang (Motormoment) mit 2 verschiedenen Ansätzen
- Momentenschätzung liefert 3 verschiedene Ergebnisse (verschiedene Lösungen)

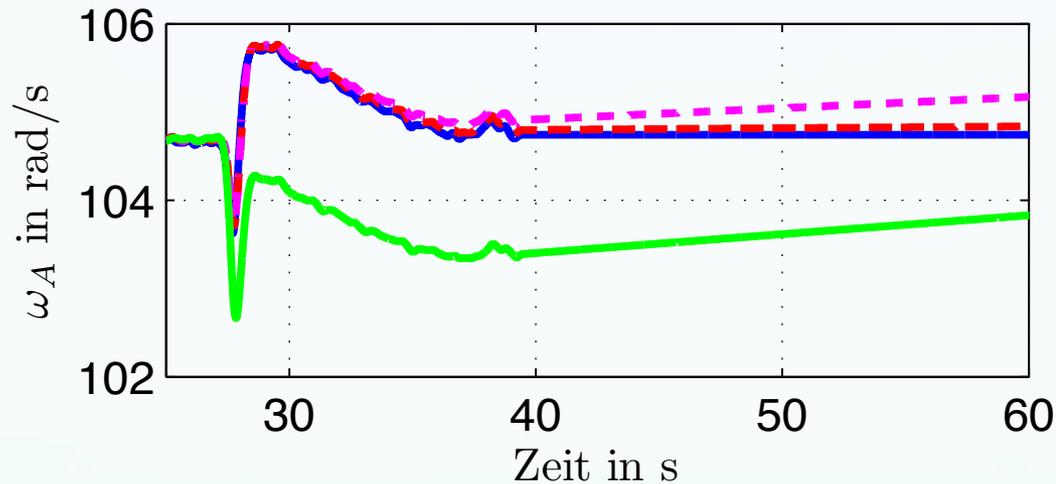
Dynamik der VKM

- Bewertung über Vergleich der geschätzten und gemessenen Drehzahlen:

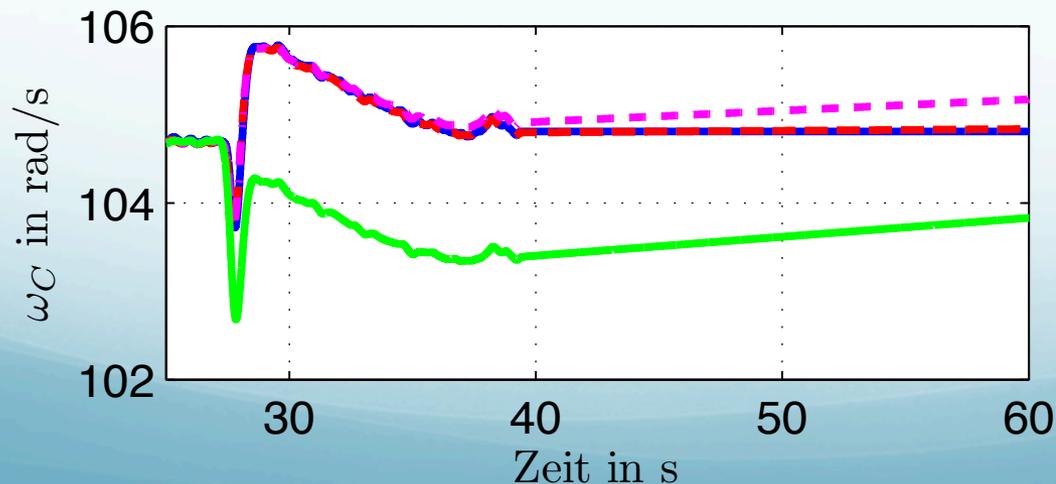


Dynamik der VKM

- Ergebnisse der Bewertung:

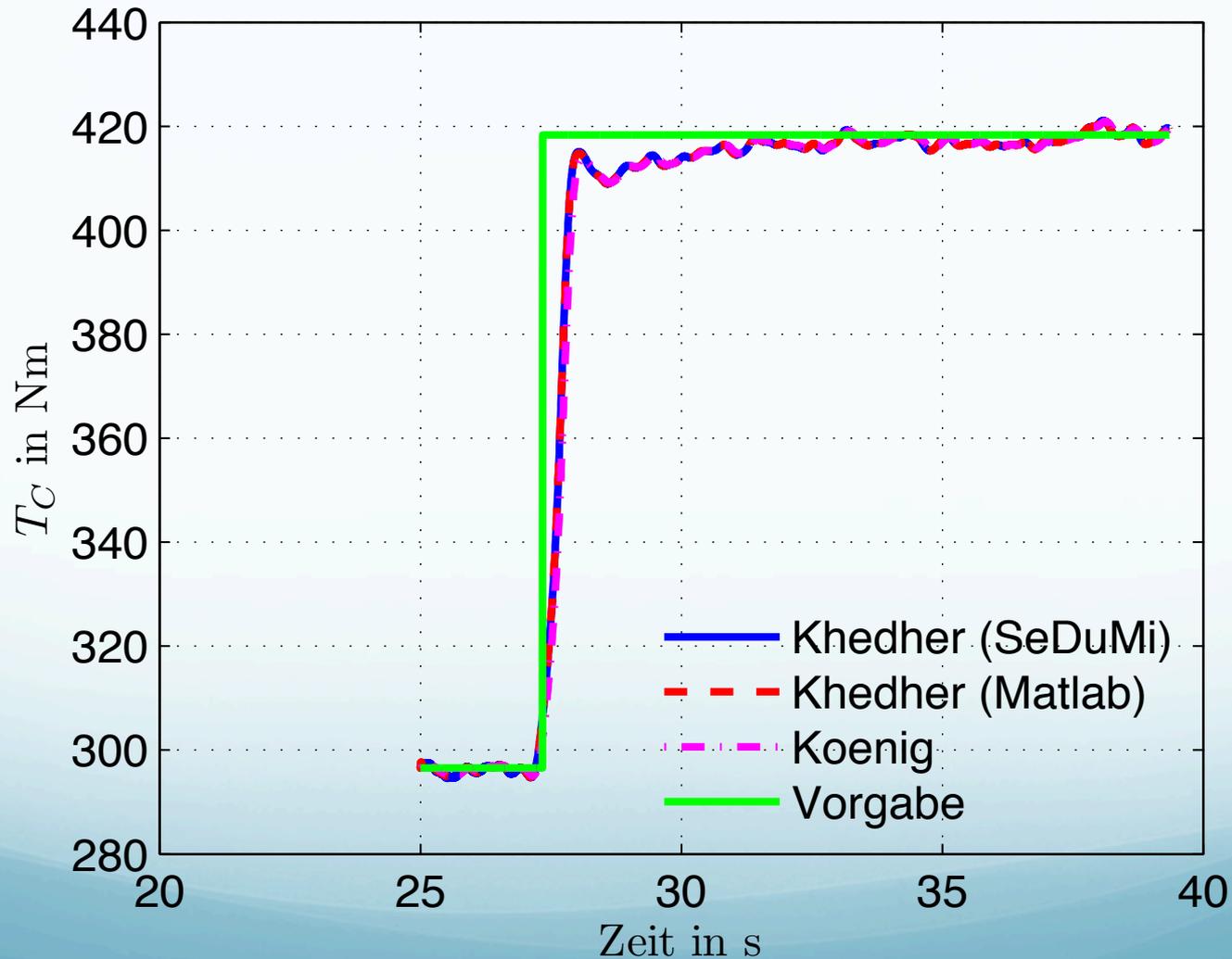


- gemessen
- - - Khedher (SeDuMi)
- · - Khedher (Matlab)
- Koenig



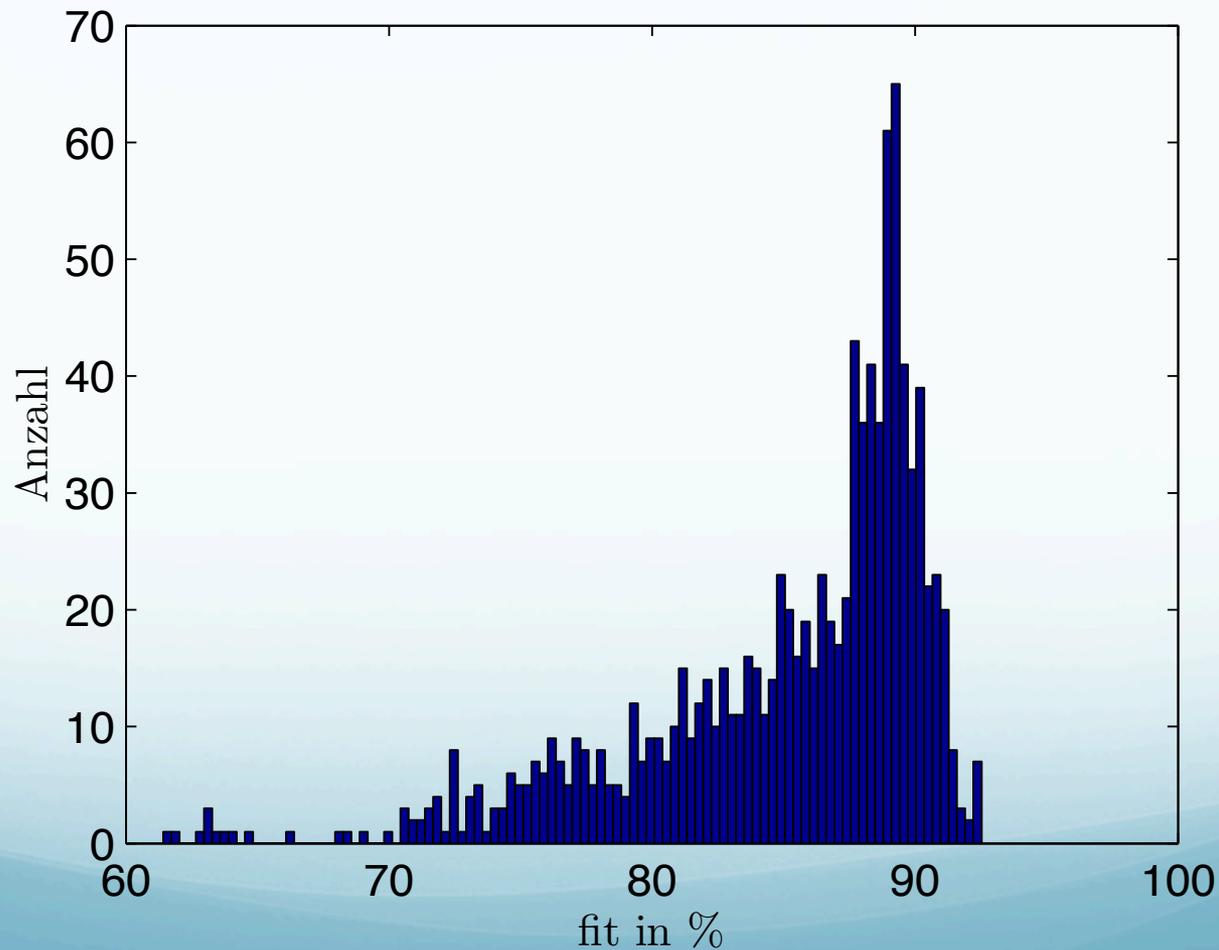
- gemessen
- - - Khedher (SeDuMi)
- · - Khedher (Matlab)
- Koenig

Dynamik der VKM



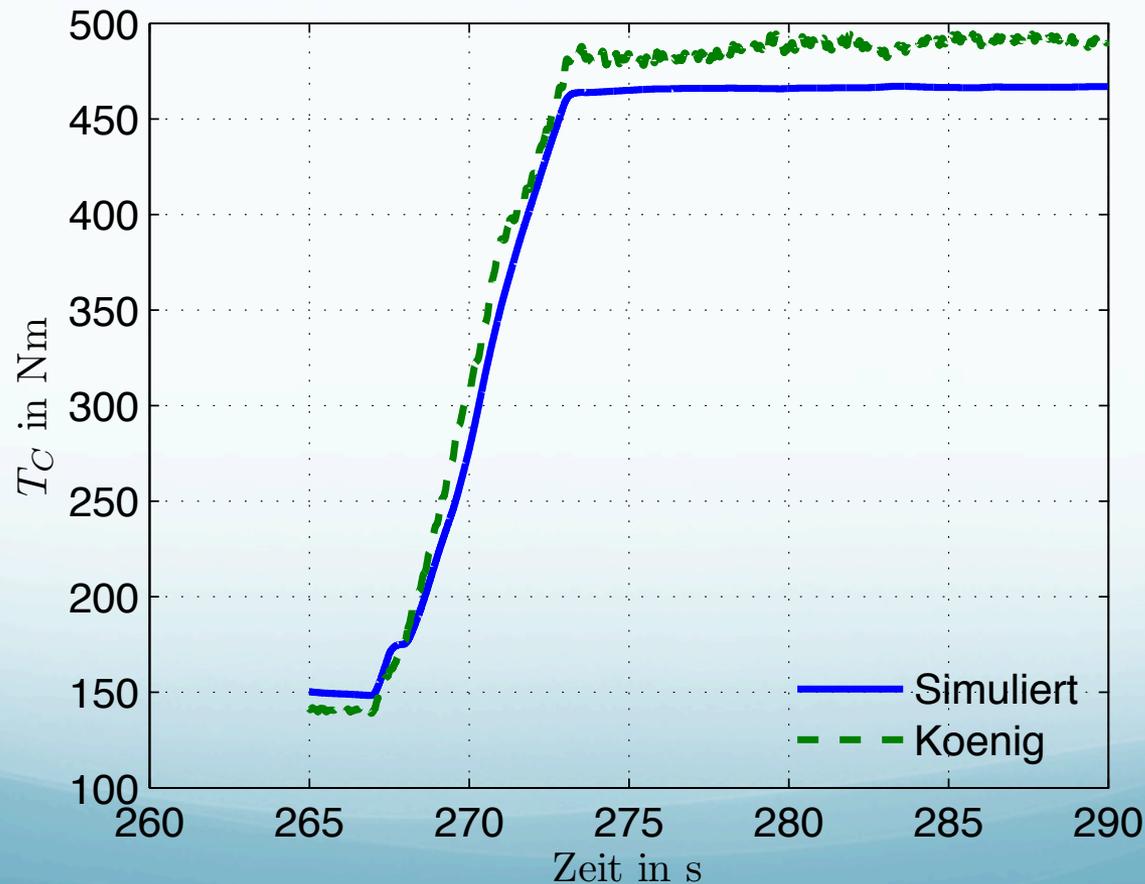
Dynamik der VKM

- Identifikation mit OE-Modell



Dynamik der VKM

- Validation des Gesamtmodells mit geschätzten Momenten

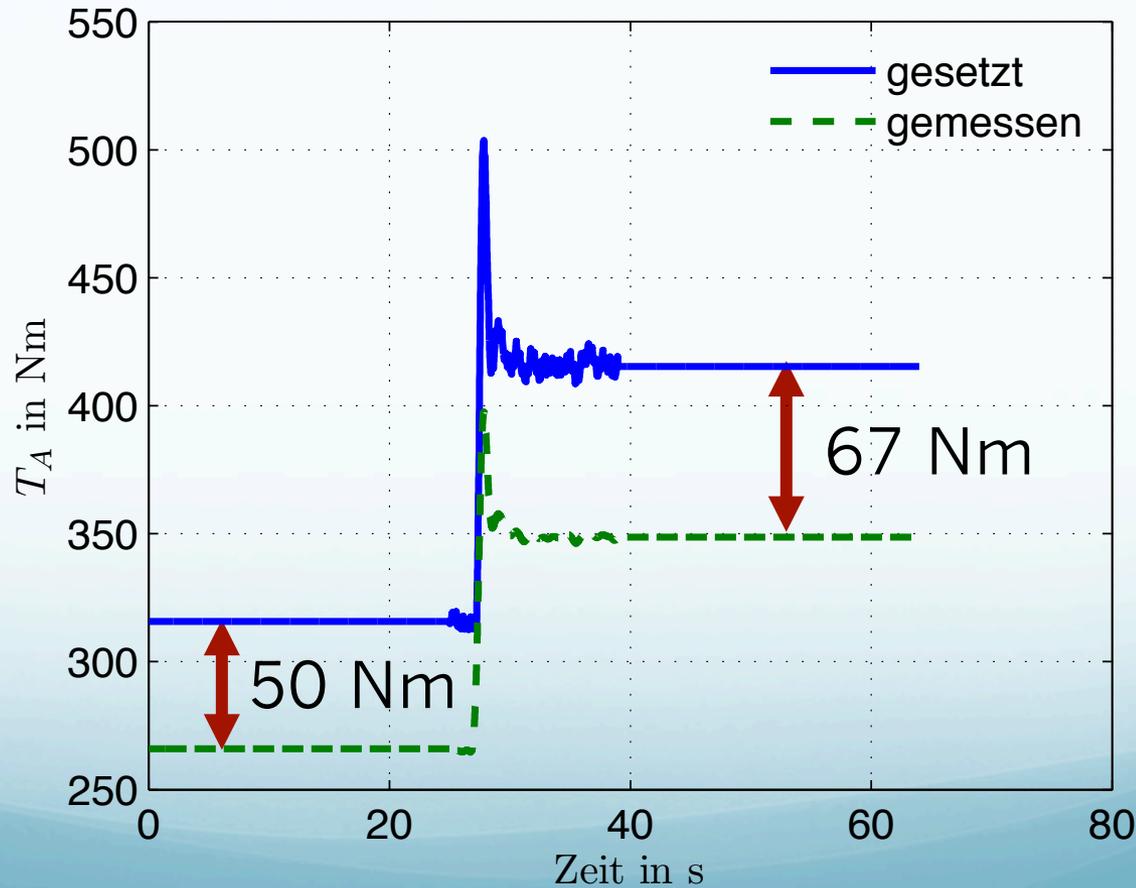


Modellierung der ASM

- Sowohl Messflanschmoment (ASM-Moment) als auch Vorgabemoment bekannt
- Ein lineares dynamisches Modell unabhängig von Moment und Drehzahl
- Problem:
 - Fit sehr schlecht, weil das stat. Moment nicht mit dem Vorgabemoment zusammenstimmt

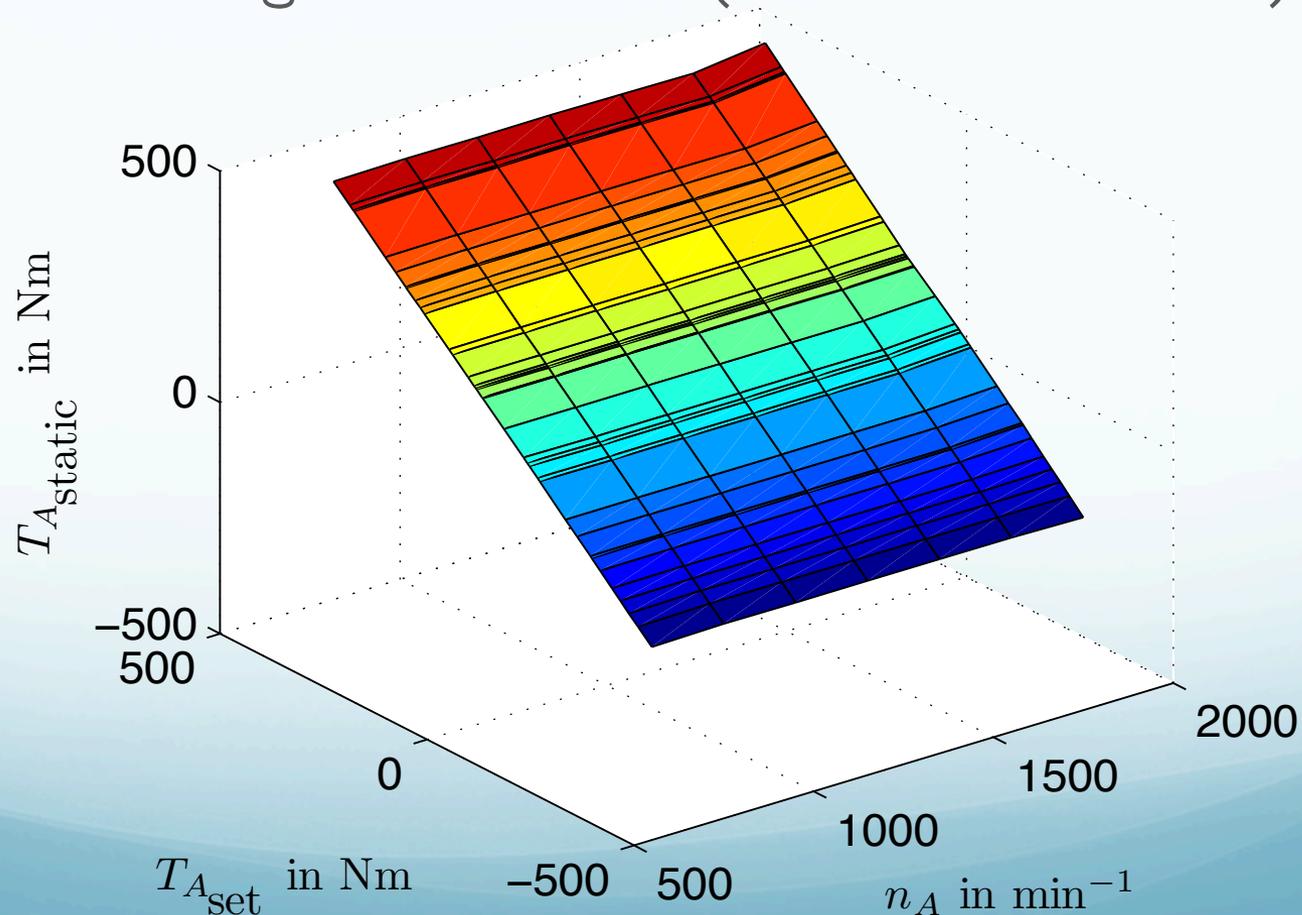
Modellierung der ASM

- Unterschied zwischen Moment des Messflansches und dem Vorgabemoment der ASM



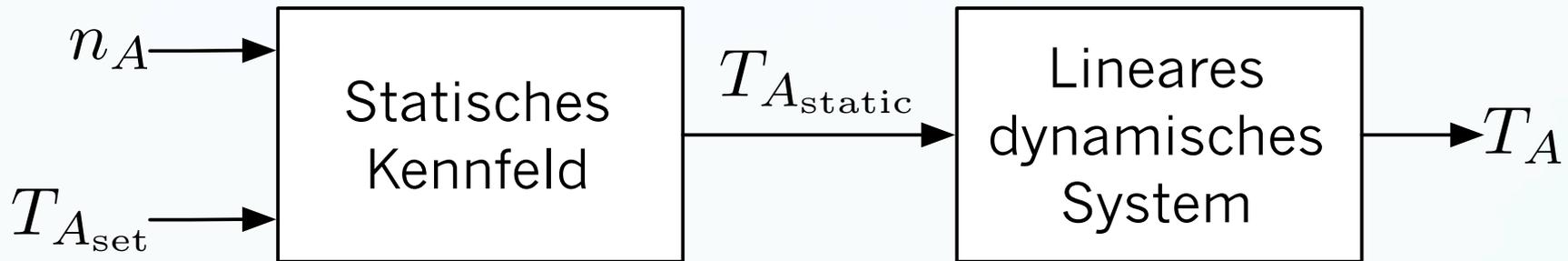
Modellierung der ASM

- Lösung: Ausgleich über eine statische Map für die Momentenvorgabe der ASM (annähernd Ebene):



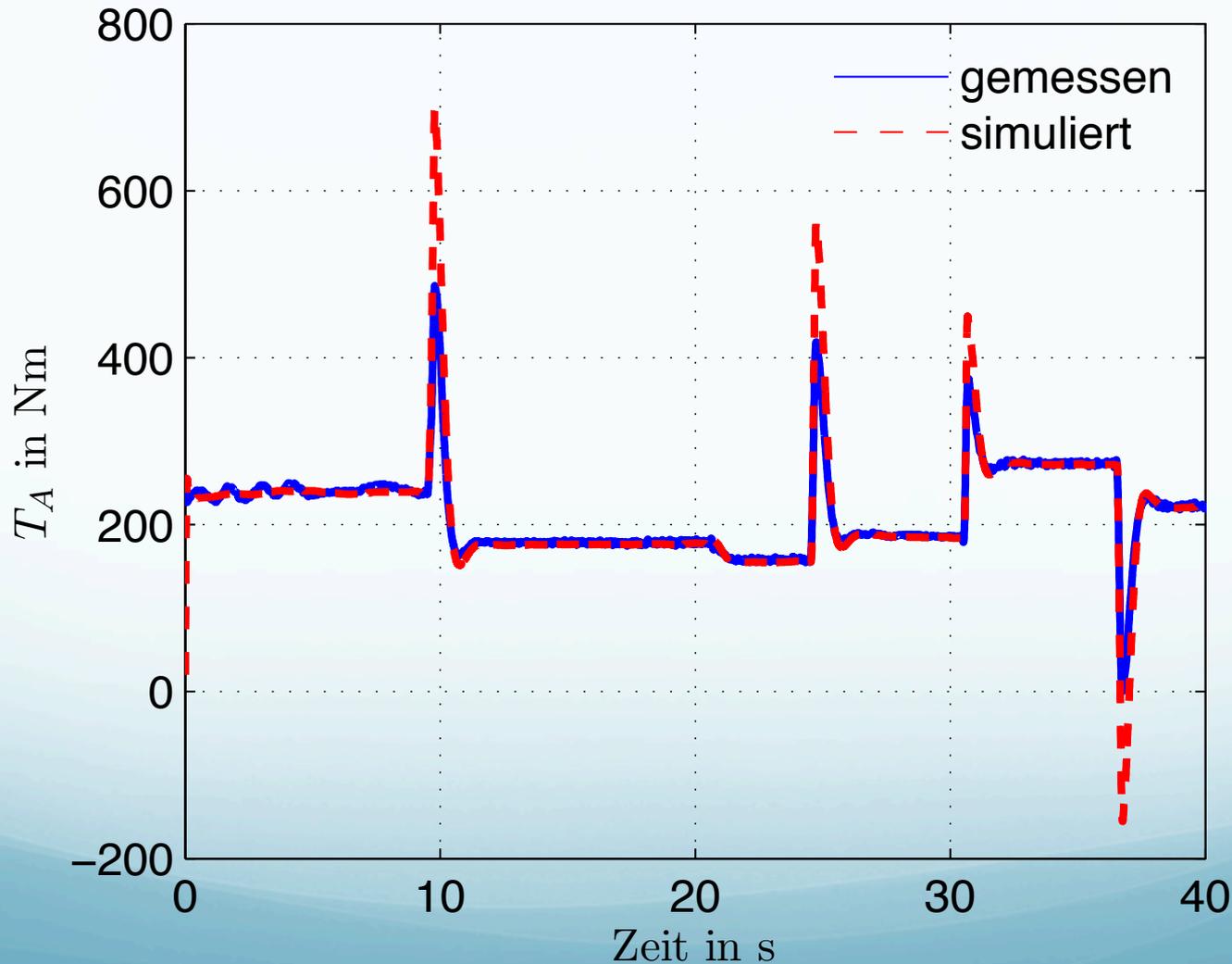
Modellierung der ASM

- Modellstruktur:



- FIT-Werte nun wesentlich besser
- Allerdings weiteres Problem: „Amplitudenhöhen“ zwischen gemessenen Moment und modelliertem Moment stimmen nicht zusammen

Modellierung der ASM

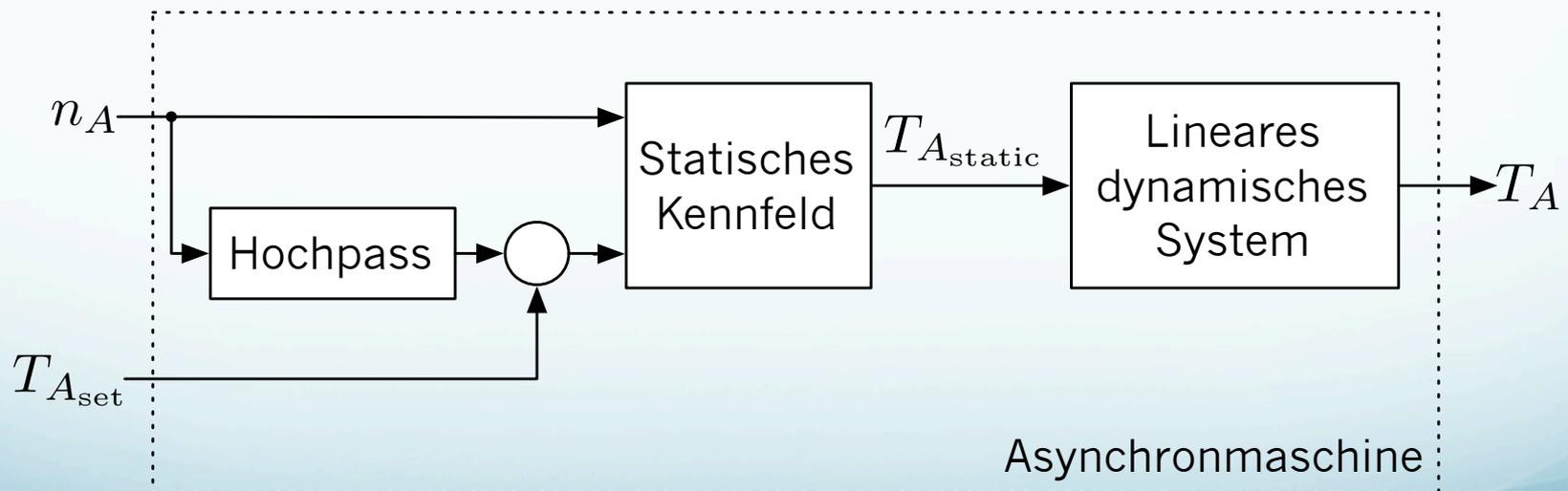


Modellierung der ASM

- Lösung: Hochpass (statt Differenzierer) entsprechend der Formel:

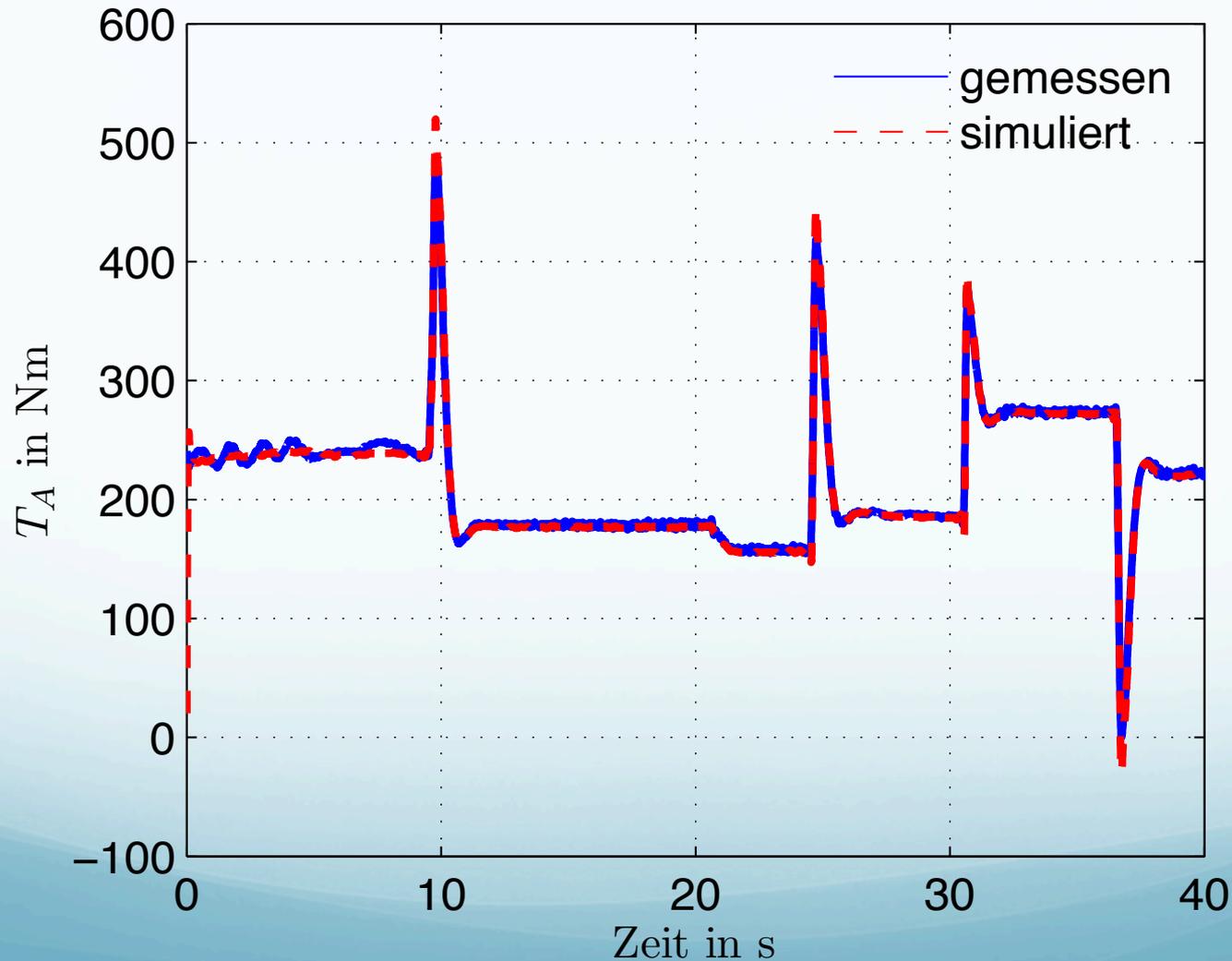
$$M_{\text{Vorgabe}} = M_{\text{Last}} + J_A \frac{d\omega}{dt}$$

- Modellstruktur:

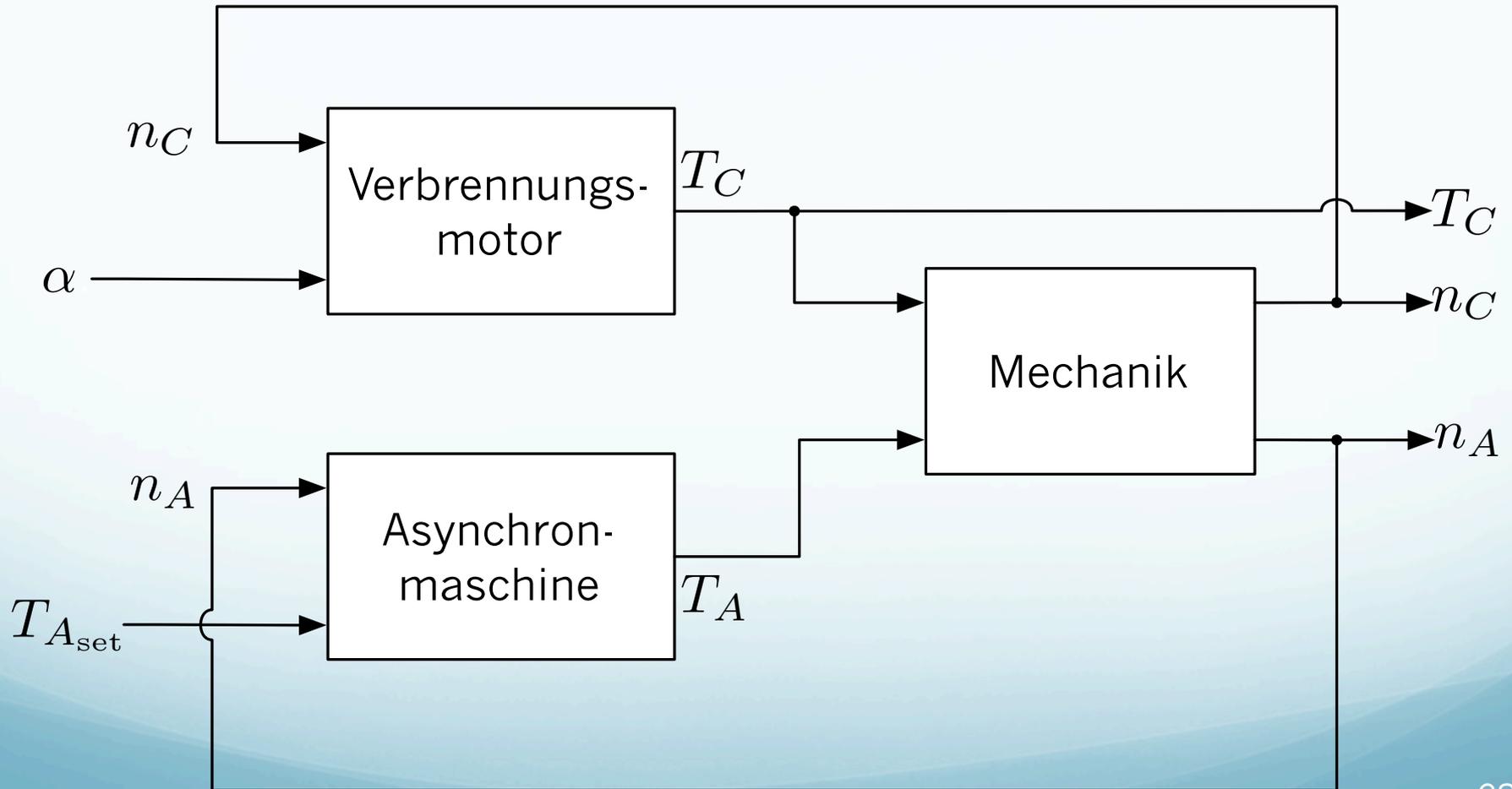


- Dadurch werden die unterschiedlich hohen Amplituden ausgeglichen, FIT-Werte bei 95–98%

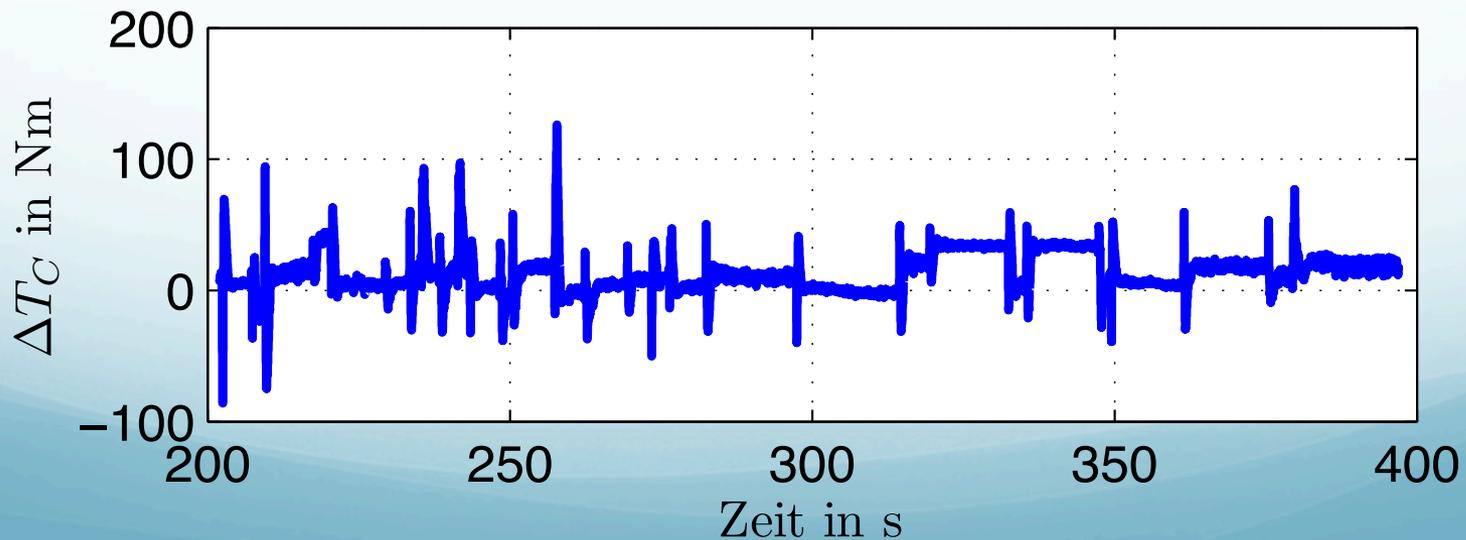
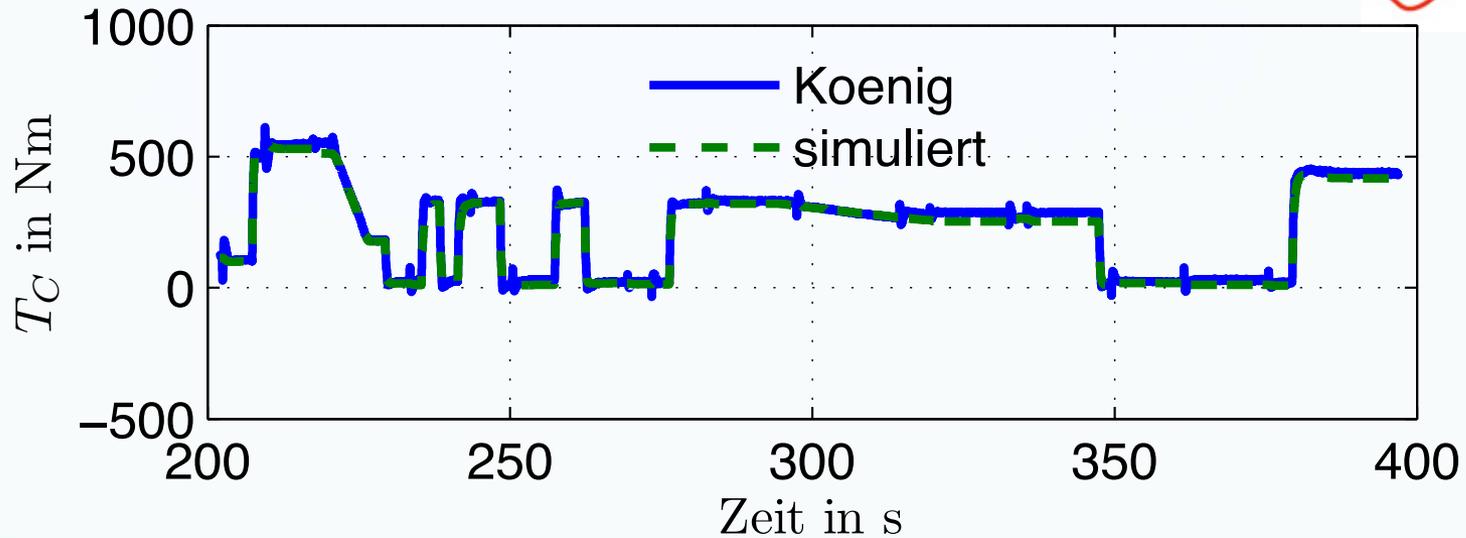
Modellierung der ASM



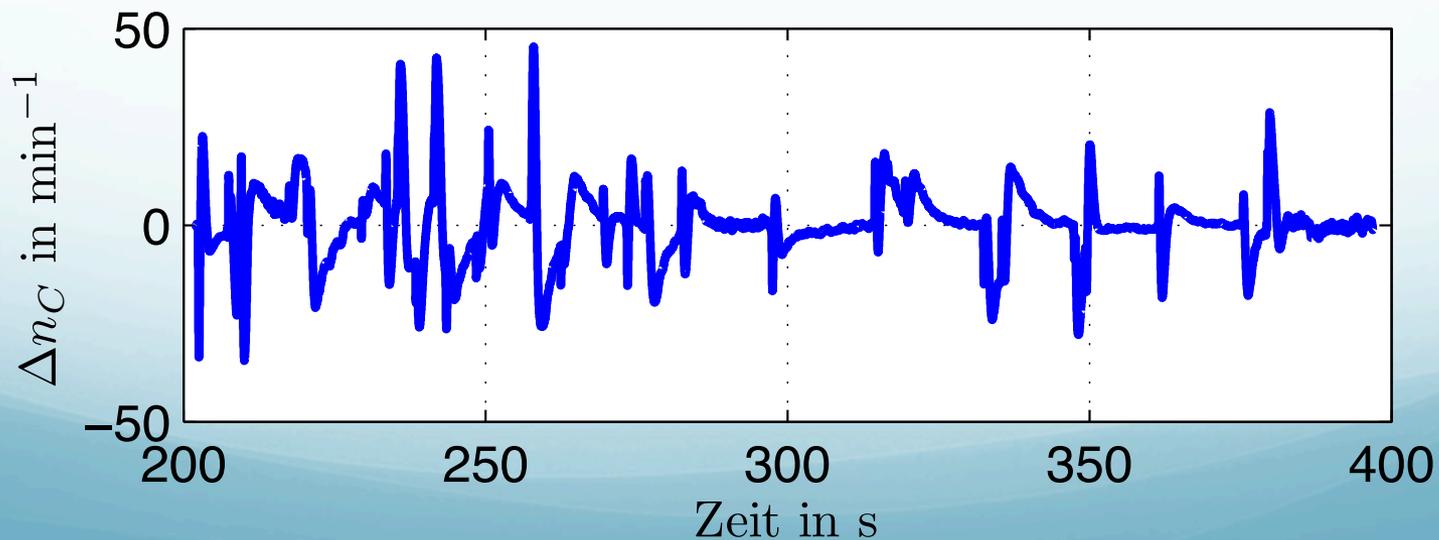
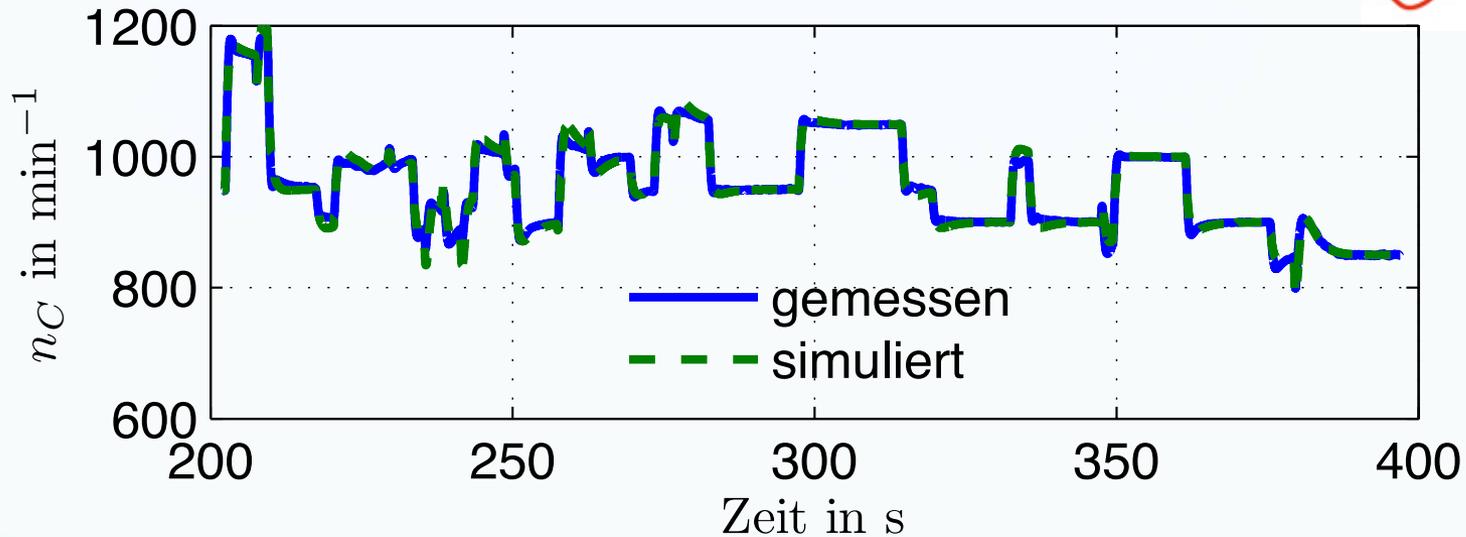
Modellaufbau



Modellaufbau



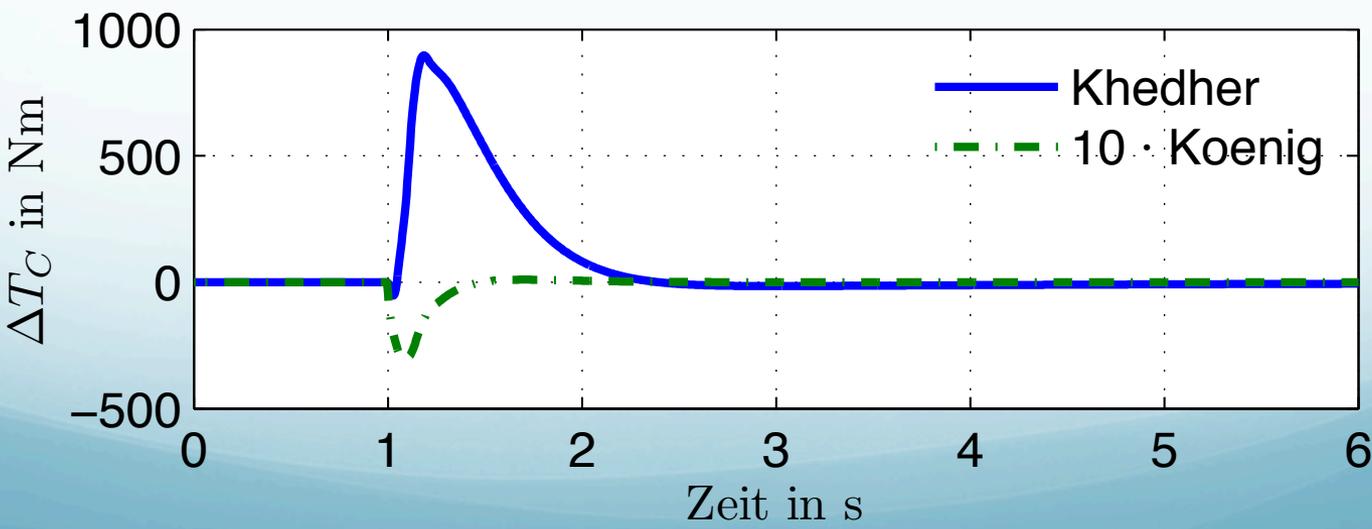
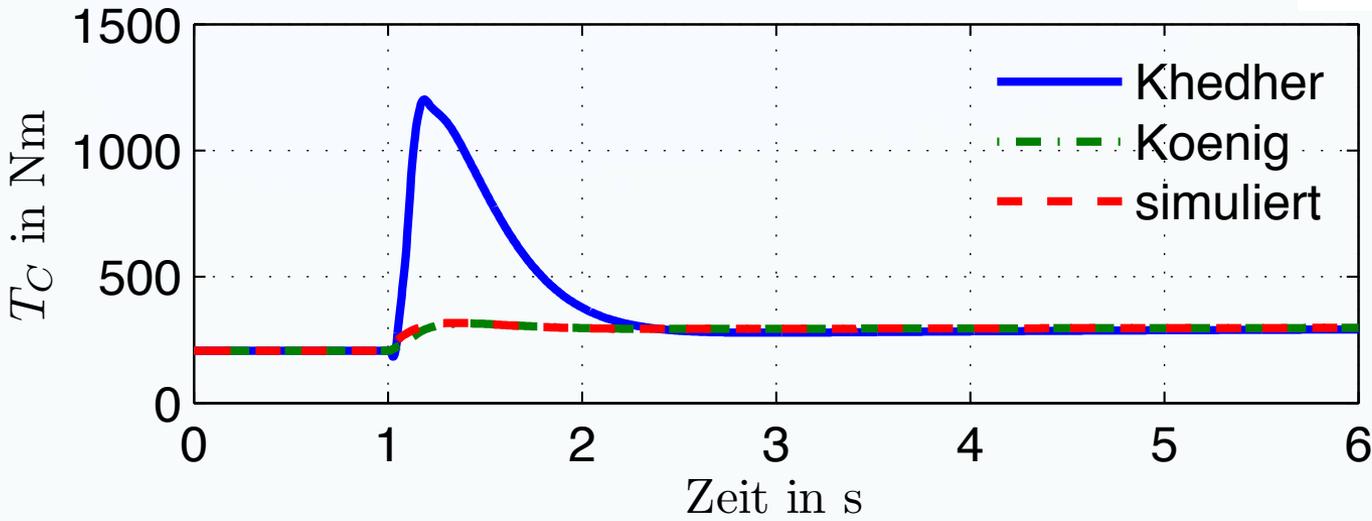
Modellaufbau



Modellaufbau

- Für Regelung wird ein Beobachter für das Motormoment benötigt
- Vergleich der Beobachter

Modellaufbau

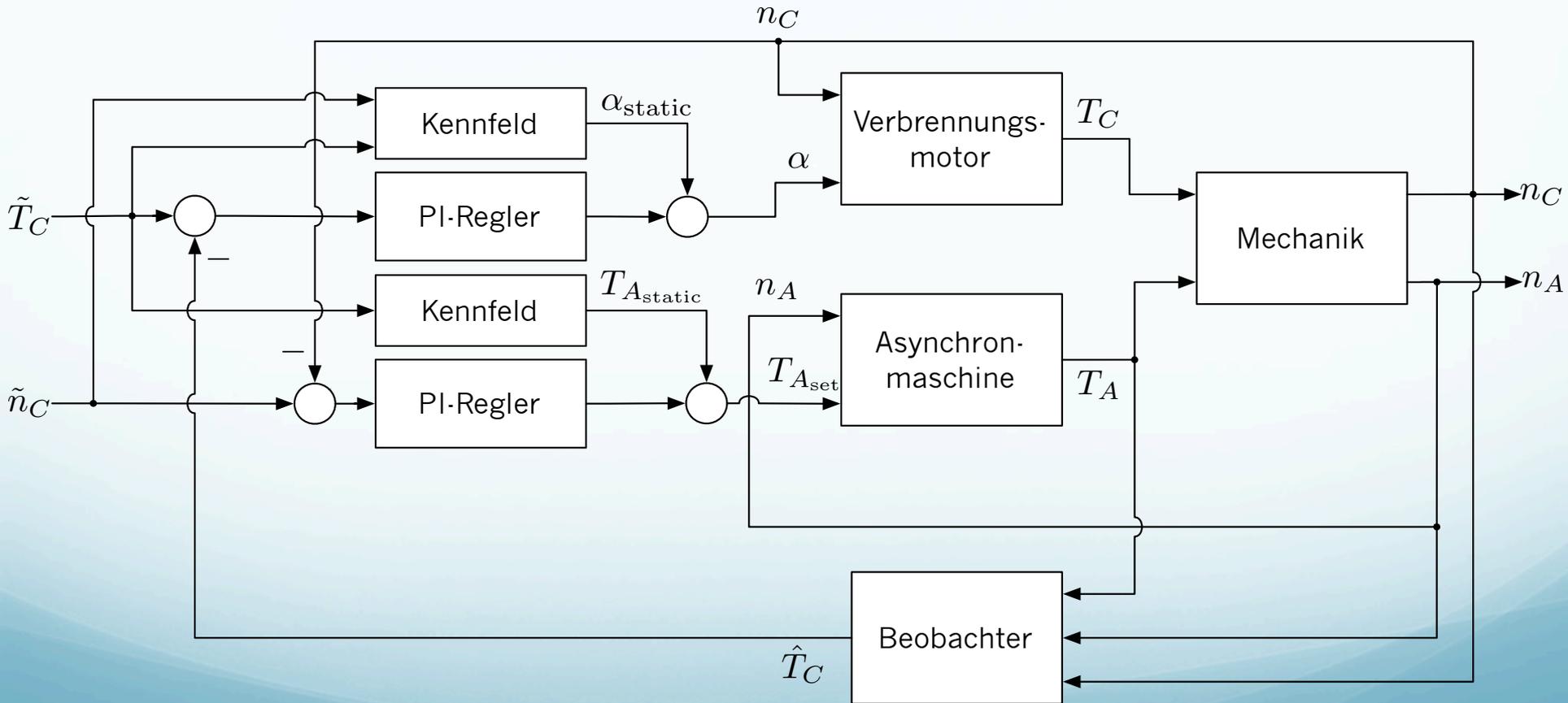


Optimale Regelung

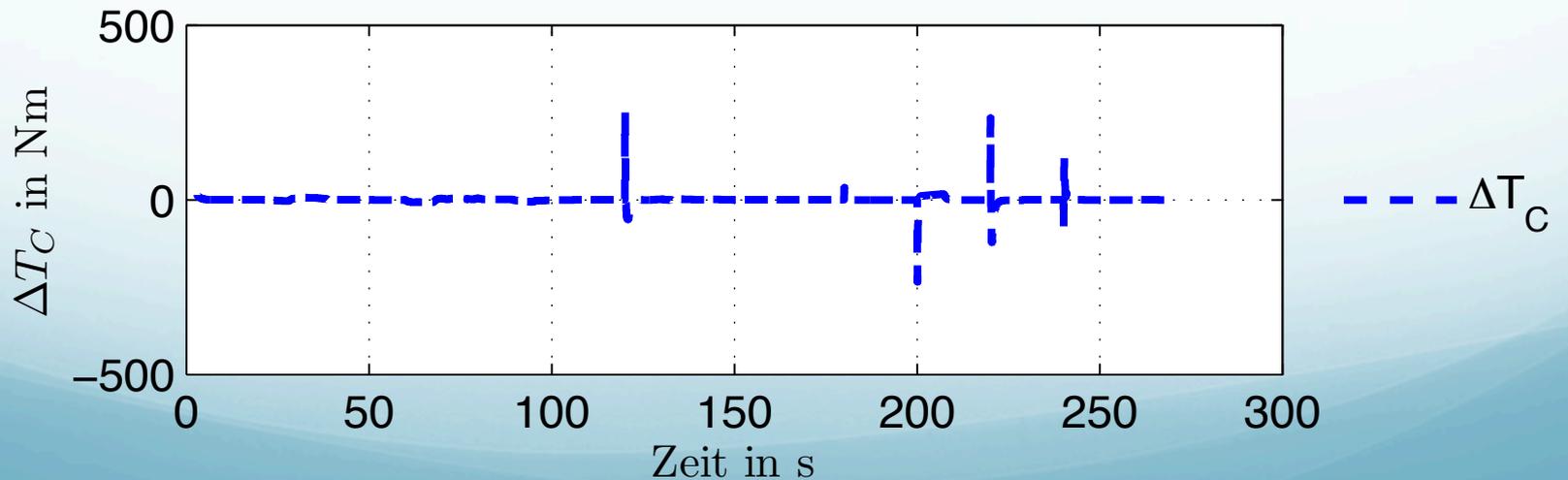
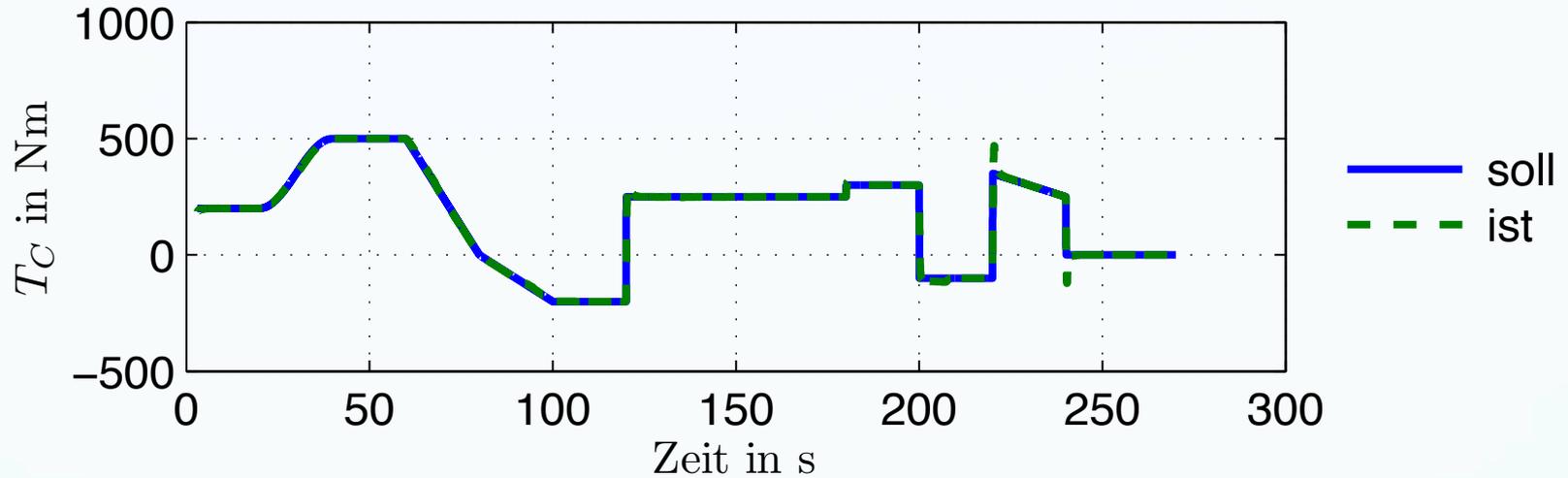
- Folgeregelung für Motordrehzahl und Motormoment
- 2 Ansätze:
 - PI- Regler
 - LQR + Kalman
- Testtrajektorien mit Sprüngen, Rampen und sinuiden Funktionen
- Berücksichtigung der Stellwertbeschränkungen

PI-Regler

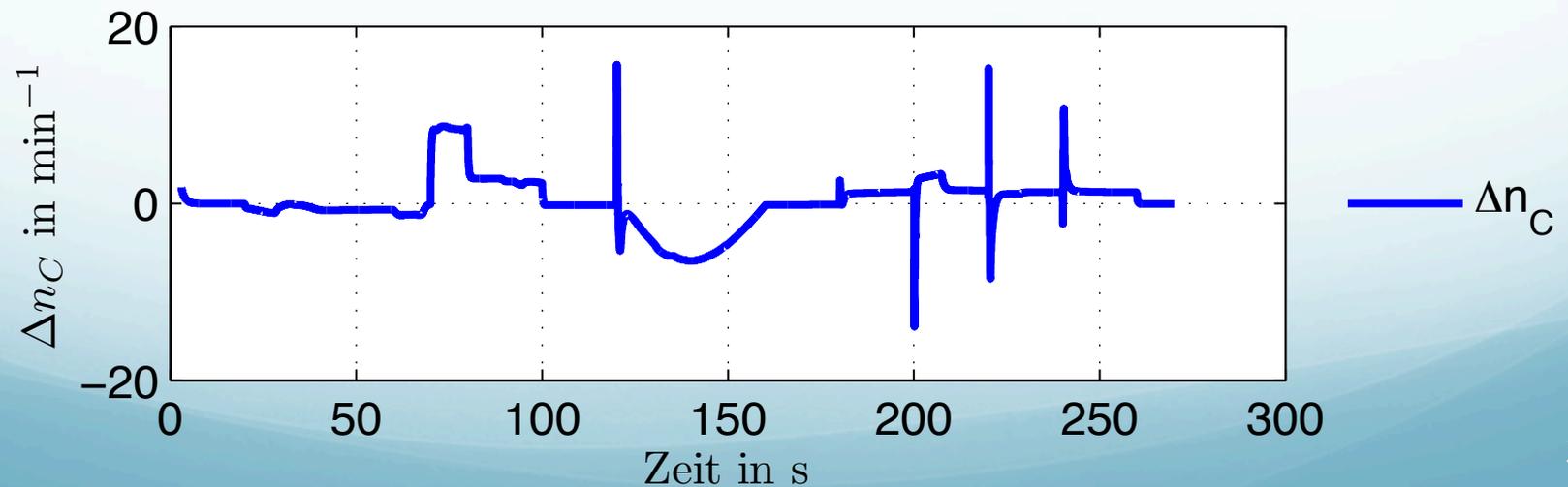
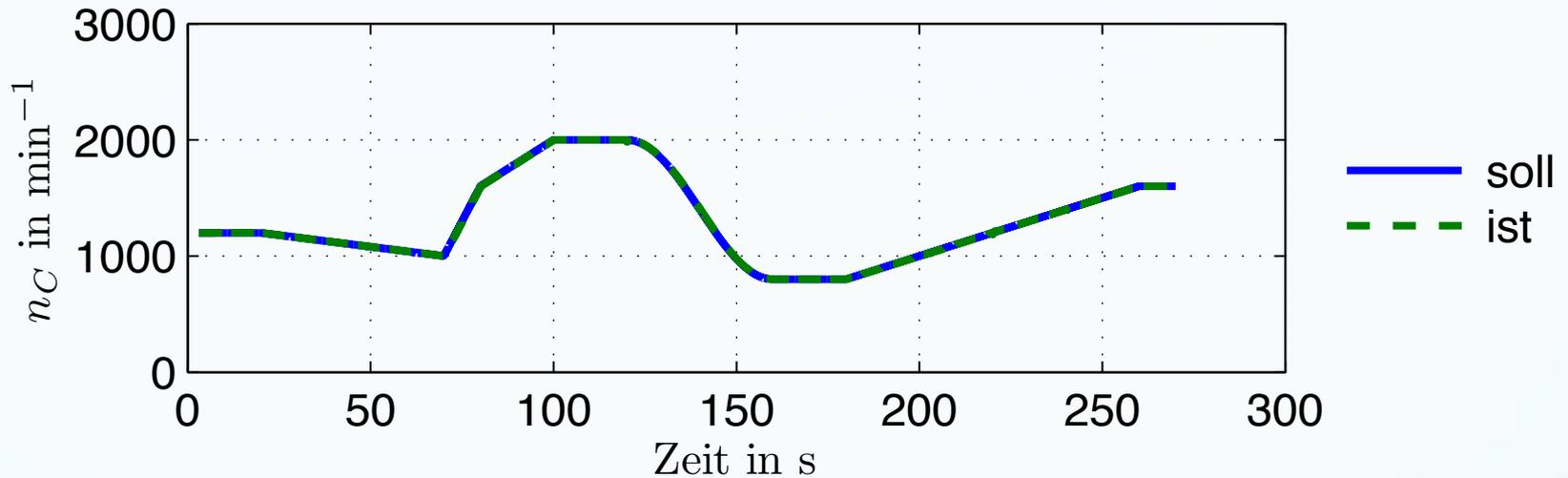
- Reglerstruktur



PI-Regler



PI-Regler



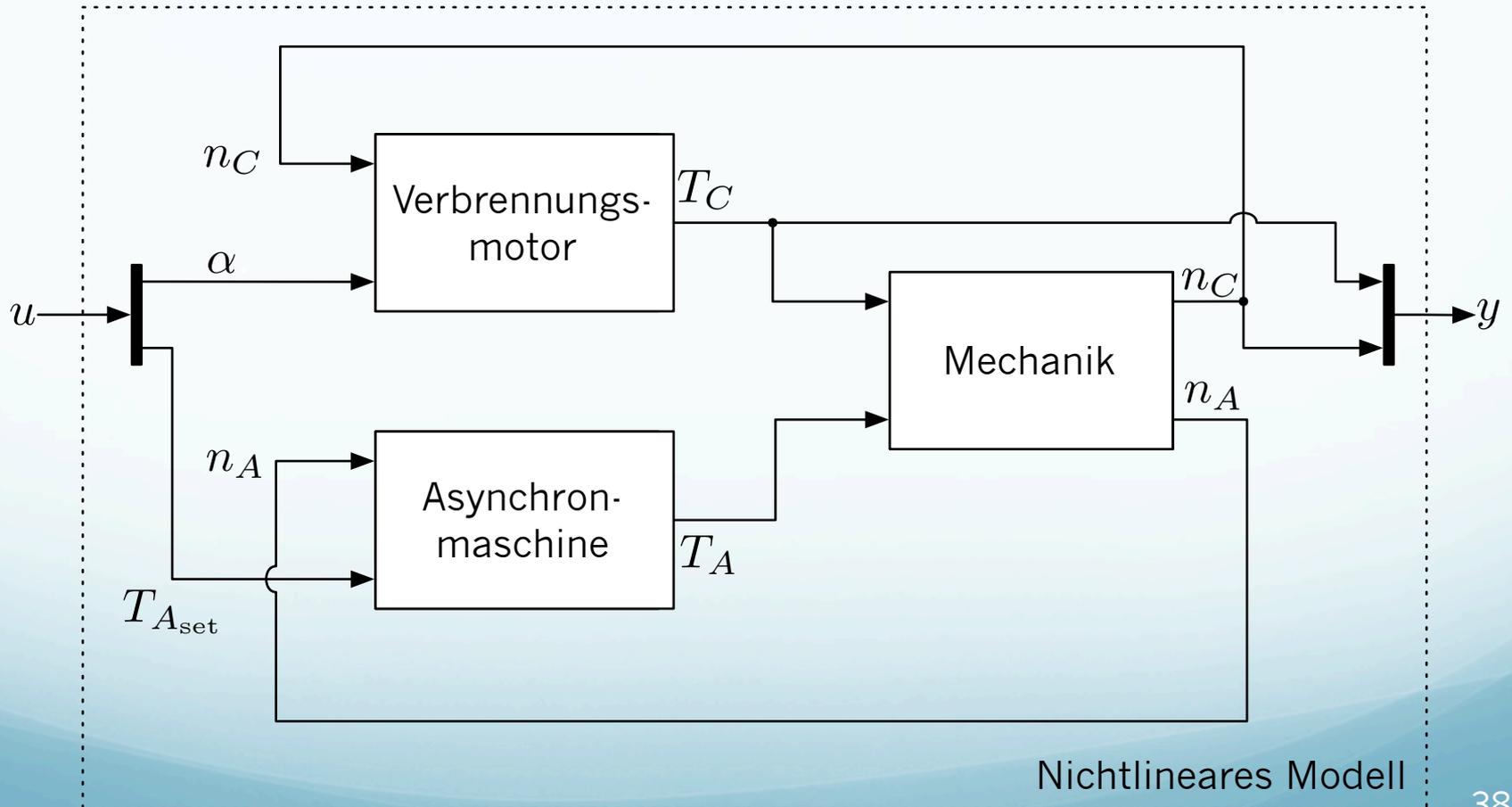
LQR



- Für LQR Linearisierung des Systems um Arbeitspunkte
- Kalman-Filter zur Schätzung der Zustände
- Insgesamt 154 lin. Systeme (11x14 Systeme)

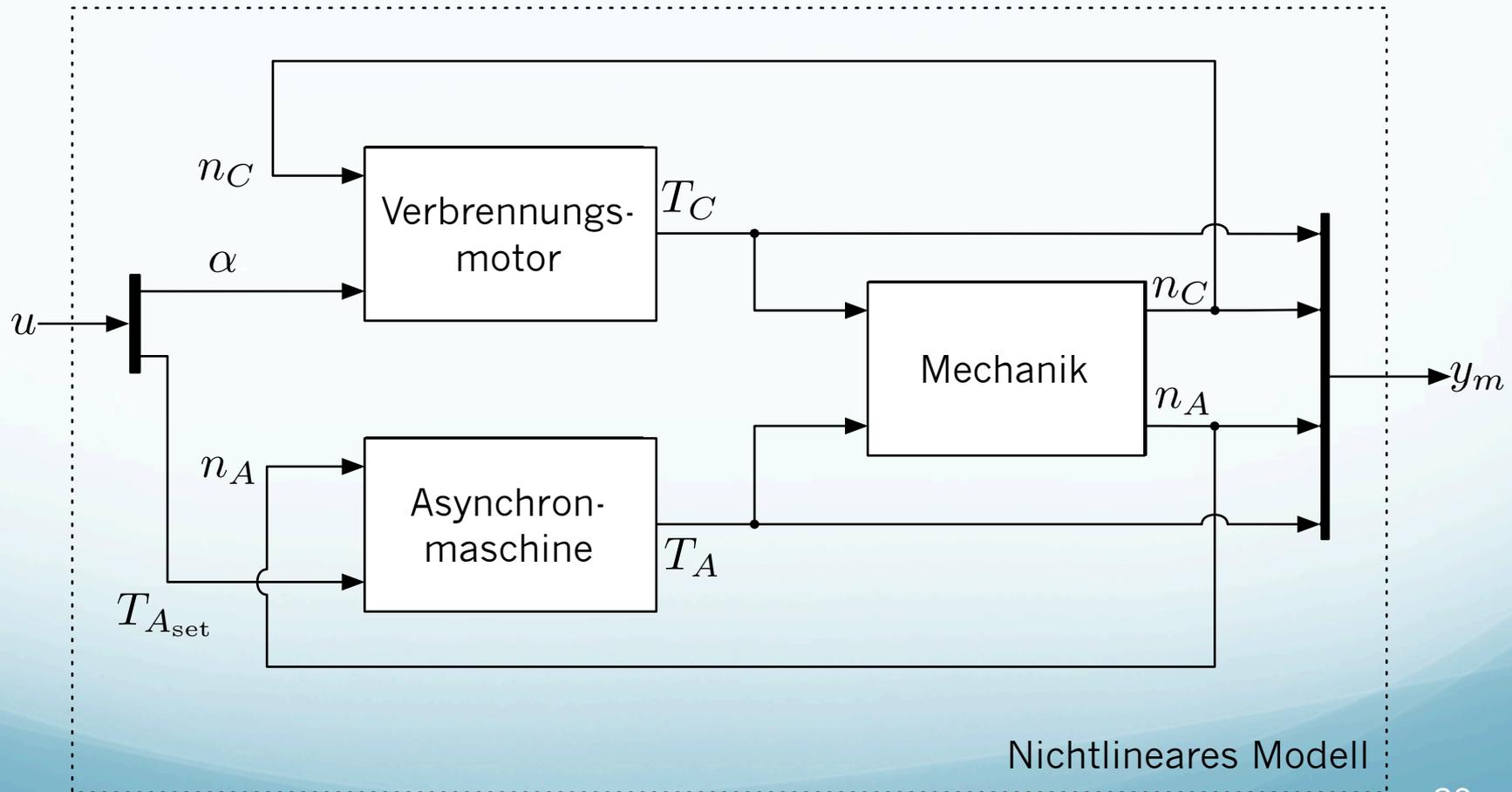
LQR

- Zu linearisierendes Modell



LQR

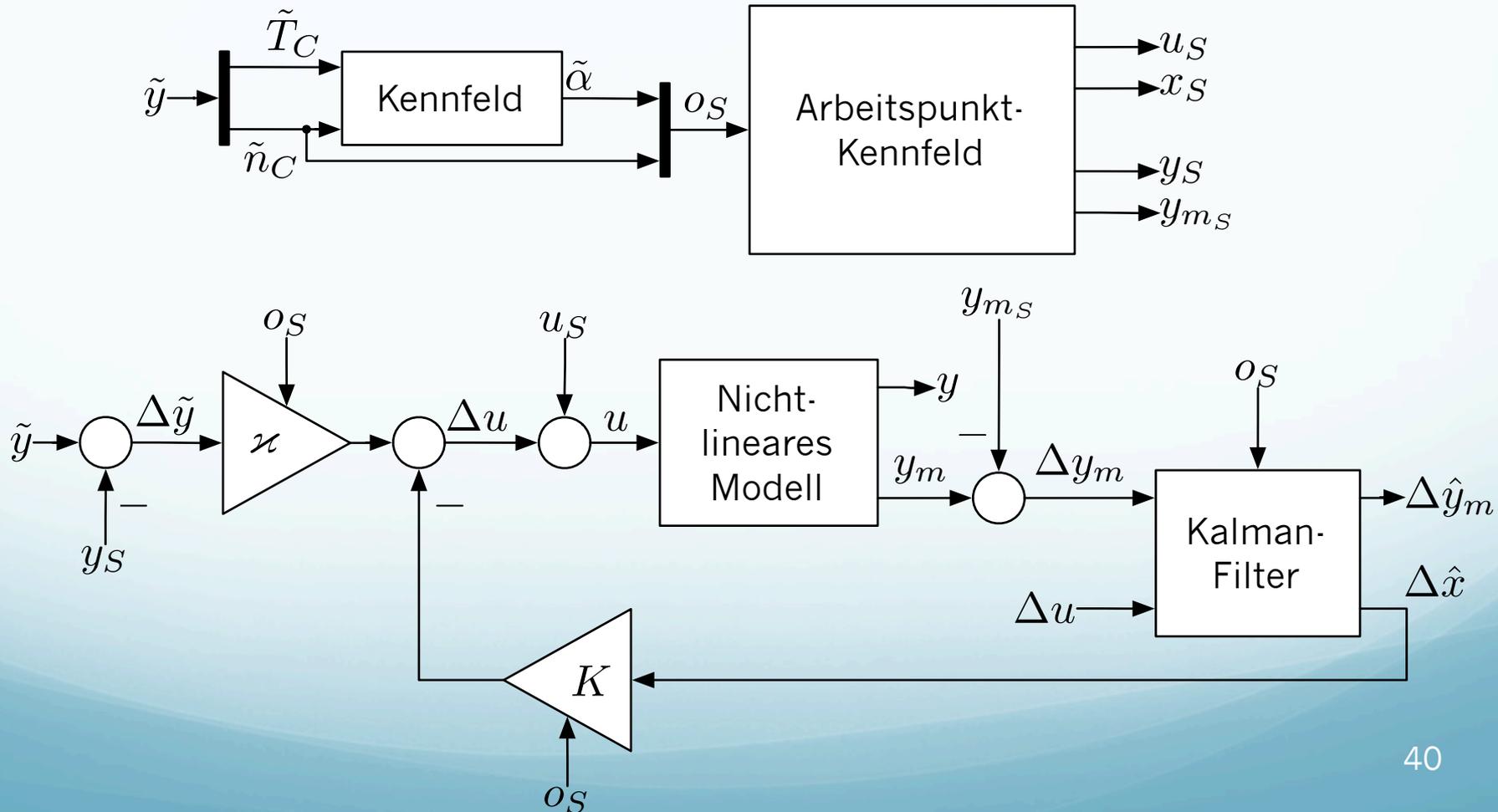
- Zu linearisierendes Modell für Kalman-Filter:



LQR



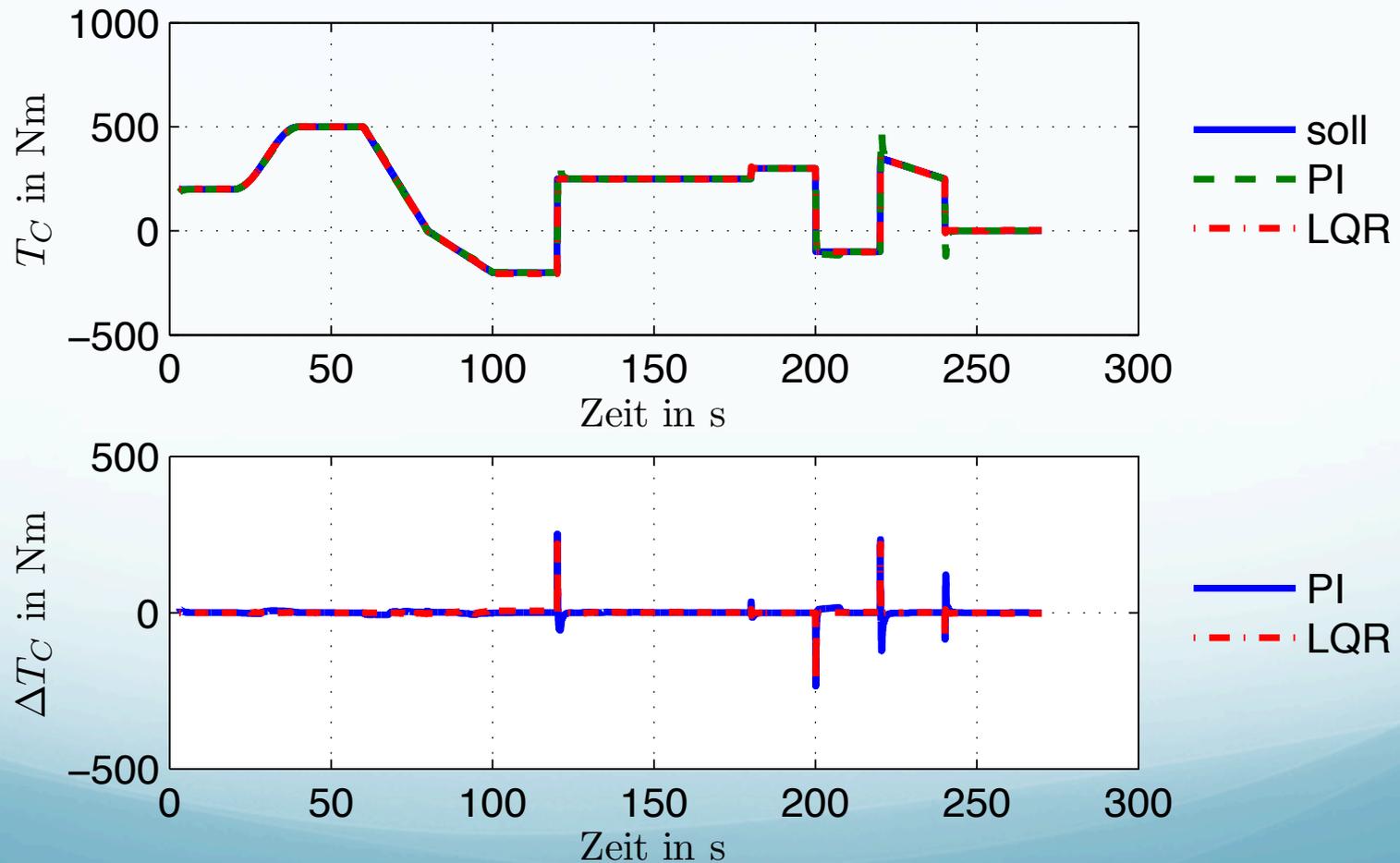
- Struktur:



LQR



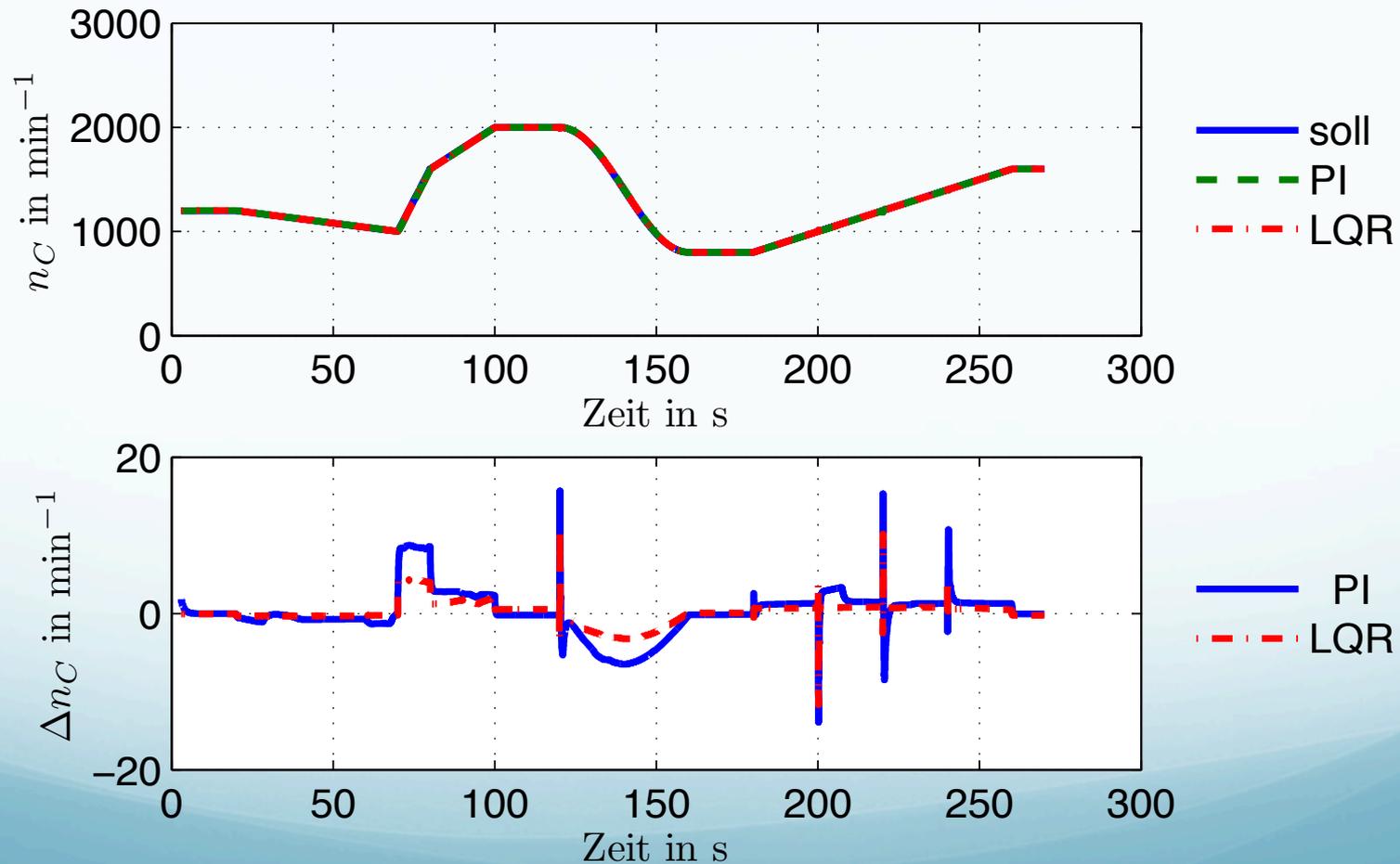
- Ergebnisse im Vergleich



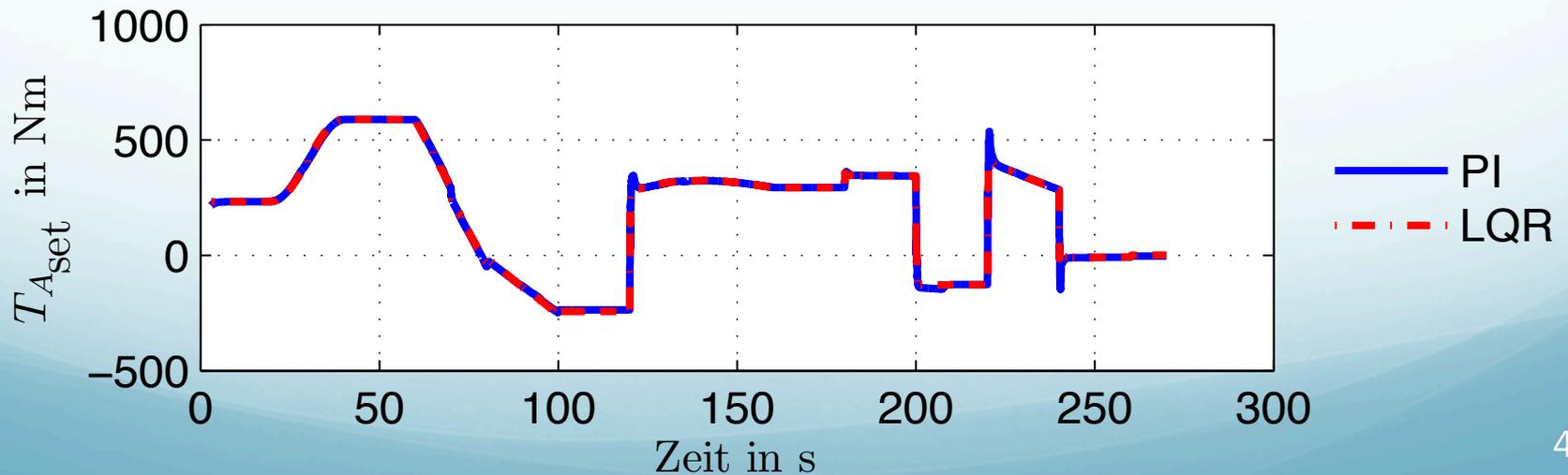
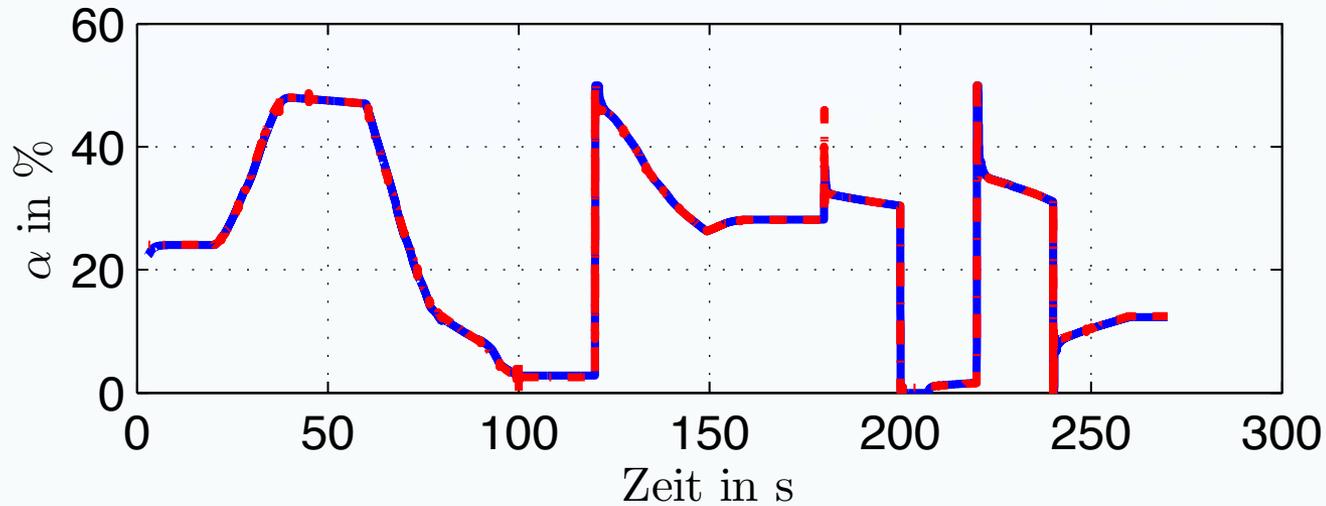
LQR



- Ergebnisse im Vergleich



Stellgrößenvergleich



Ausblick

- Testen der Regler am Prüfstand
- Verfeinertes Modell des Motors
- Hydrodynamisches Dynamometer in Simulation einbinden
- Verbesserung der Regler

Vielen Dank!