

Labor für Regelungstechnik und Mechatronik

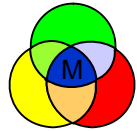


**Fachhochschule**  
**Lippe und Höxter**  
University of Applied Sciences

# **Antriebstechnische Regelungskonzepte bei unzulänglicher Mechanik**

**4. Fachwissenschaftliches Kolloquium für  
Angewandte Automatisierungstechnik in Lehre und Entwicklung  
an Fachhochschulen (AALE2007), Lemgo, 15.02.2007**

**Prof. Dr. Jürgen Maas**  
**Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik**  
**Labor für Regelungstechnik und Mechatronik**  
**juergen.maas@fh-luh.de**  
**Phone: +49 (0)5261 702-192**



# Übersicht

## Problemstellung

- Typische Unzulänglichkeiten im Antriebsstrang
- Elastisch gekoppeltes Zweimassensystem (ZMS)

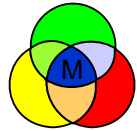
## Regelungskonzepte bei antriebsseitiger Positionserfassung

- Zustandsregelung mit Störgrößenbeobachter und -aufschaltung
- PI-Zustandsregelung
- Alternativkonzepte

## Parameteridentifikation und automatisierte Inbetriebnahme

- Identifikationsverfahren

## Prüfstände und Ausblick

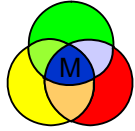


## Problemstellung

### Produktionsmaschine mit hohen Anforderungen an die Genauigkeit



Quelle:  
Motek 2006  
Sinsheim

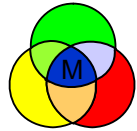


## Problemstellung

### Typische Unzulänglichkeiten im Antriebsstrang

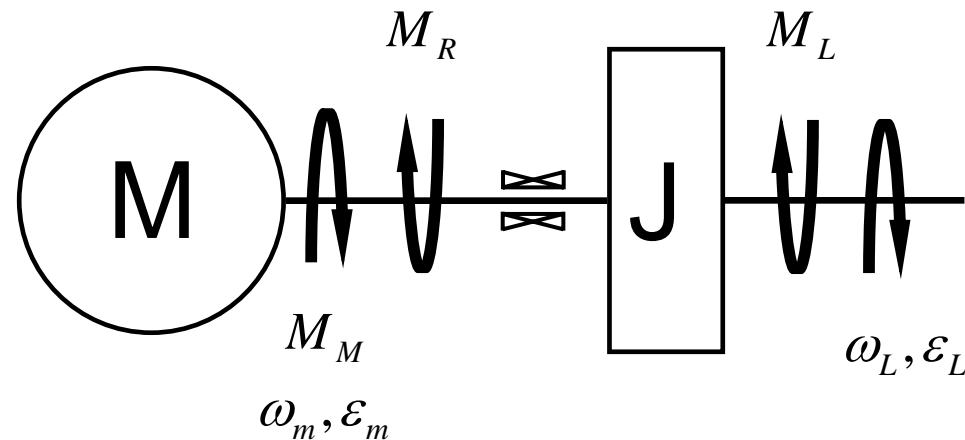
- Reibung
  - sowohl antriebsseitig
  - als auch abtriebsseitig

⇒ Grenzyklen bei Feinpositionierung  
Kompensation durch Reibungsaufschaltung möglich
- Getriebelose
  - ⇒ Grenzyklen im Positioniervorgang
- Nachgiebigkeiten durch Getriebe, Kupplungen, Antriebswelle oder Riemen
  - signifikante niederfrequente Eigenfrequenzen
  - mit geringer bis hoher Dämpfung



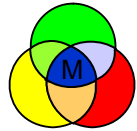
## Motivation

- **Starr angenommene Kopplung von Antriebs- und Abtriebsmaschine**  
⇒ **Einmassensystem (EMS)**



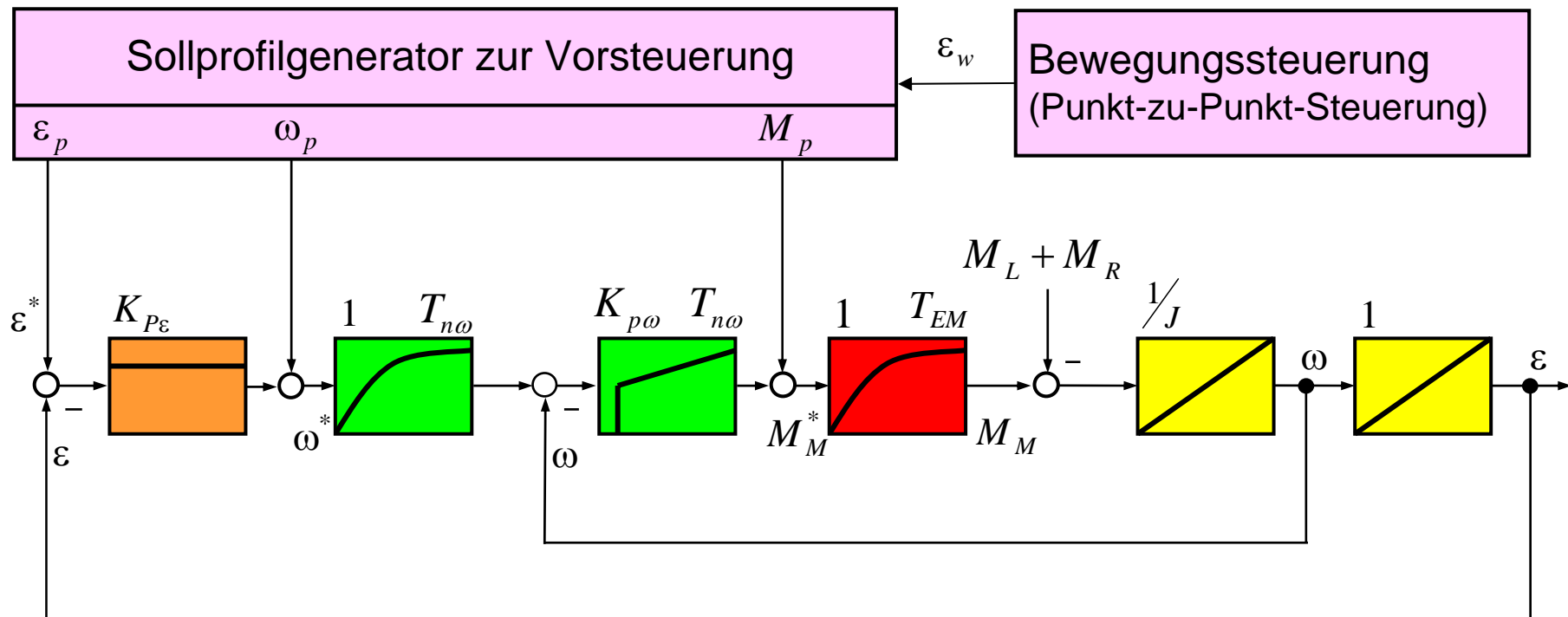
**bei starre Kopplung**  $\Rightarrow J = J_A + J_L, \quad \omega_m, \epsilon_m \approx \omega_L, \epsilon_L$

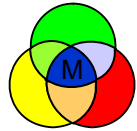
Typische Entwurfsgrundlage für industrielle Regelungen



## Bewährtes Regelungskonzept bei starrer Kopplung

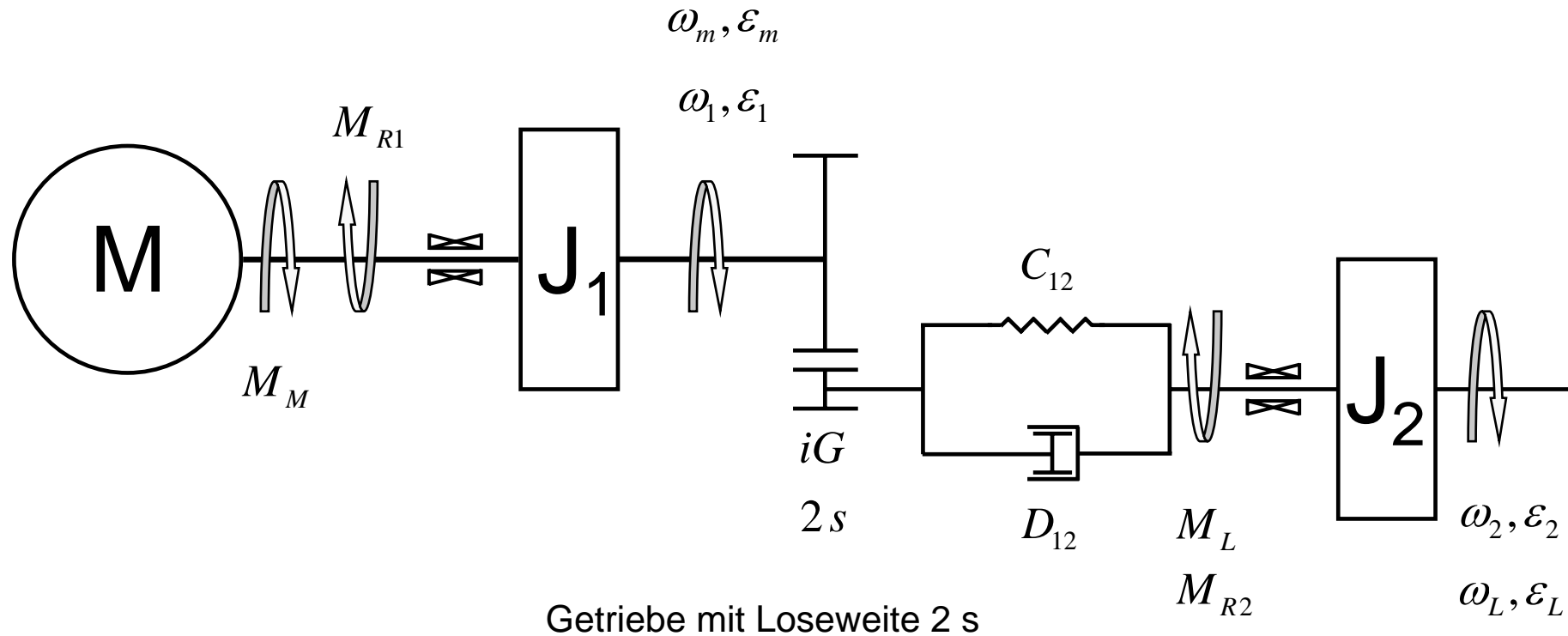
- Kaskadenregelung mit Vorsteuerung für Punkt-zu-Punkt-Positionierung (ruck, drehmoment- und drehzahlbegrenzt)

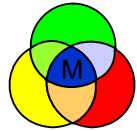




## Verhalten des Antriebsstrangs in vielen Anwendungsfällen

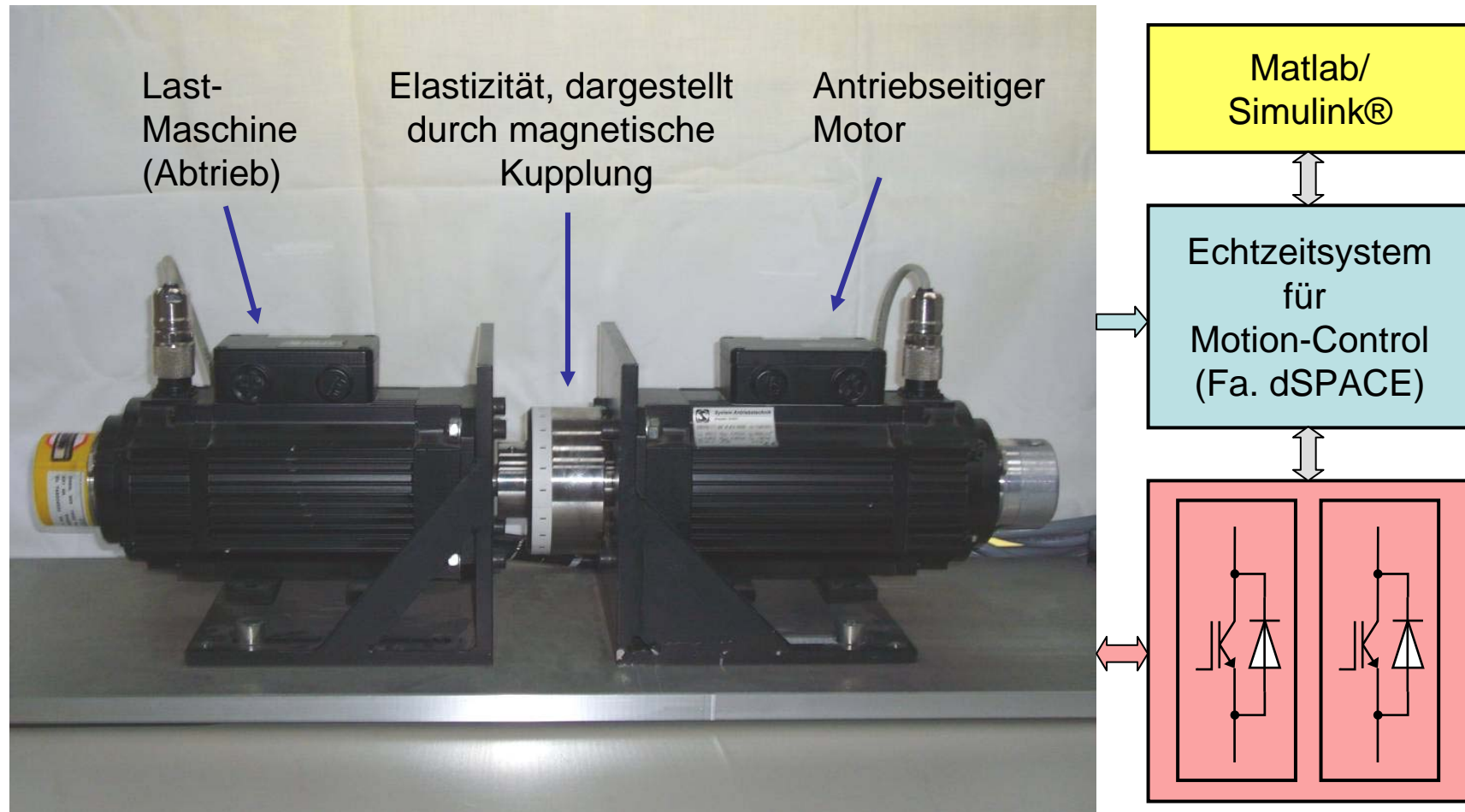
- Elastisch gekoppelter Antriebsstrang mit Getriebespiel und Reibung  
⇒ **Zweimassensystem (ZMS)**

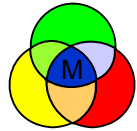




## Versuchsstand zur experimentellen Untersuchung

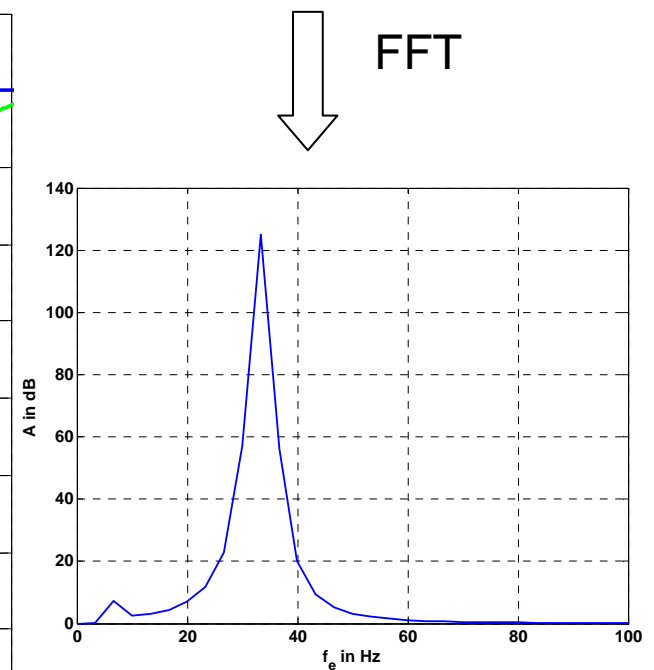
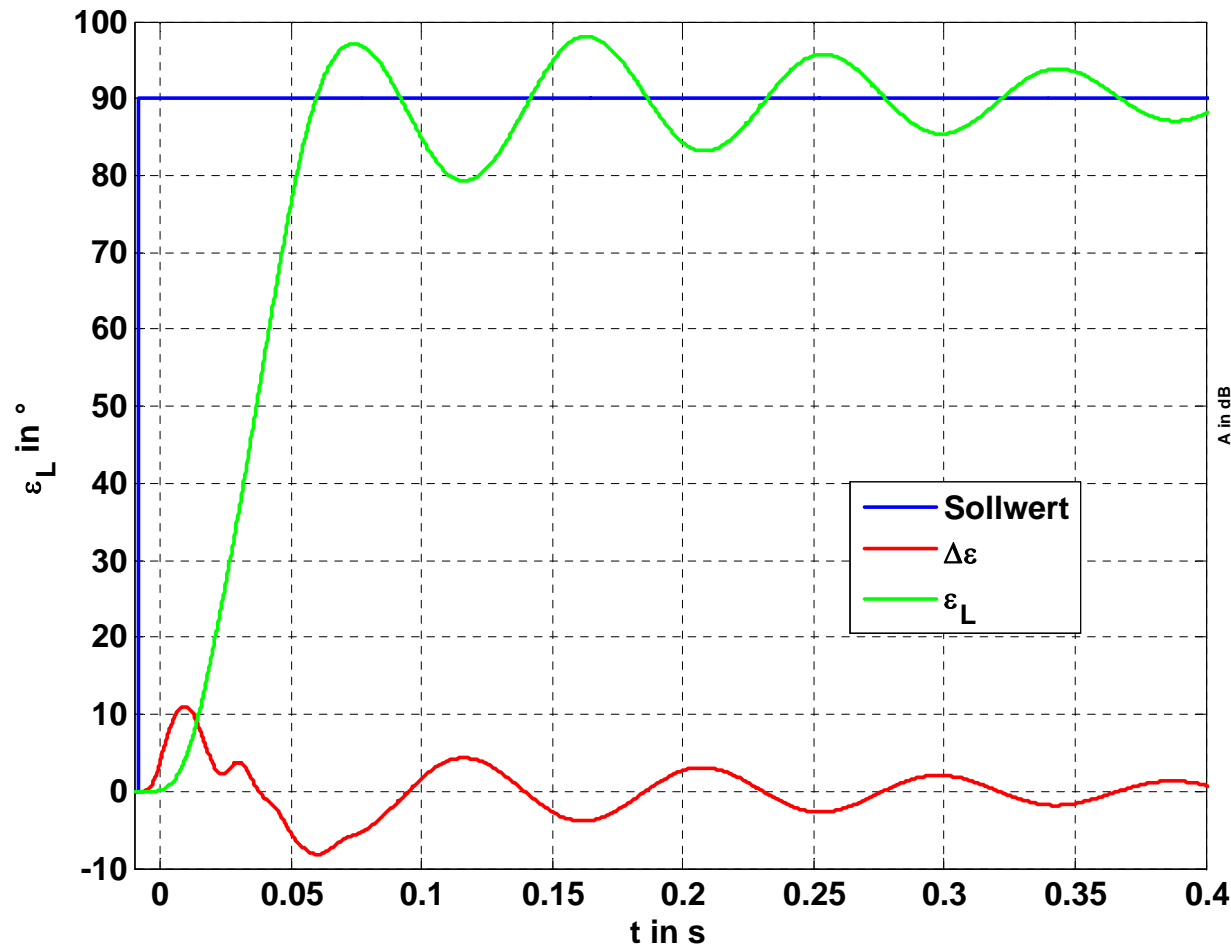
- Antriebsversuchstand mit elastischer Kopplung (ohne Lose)

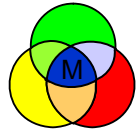




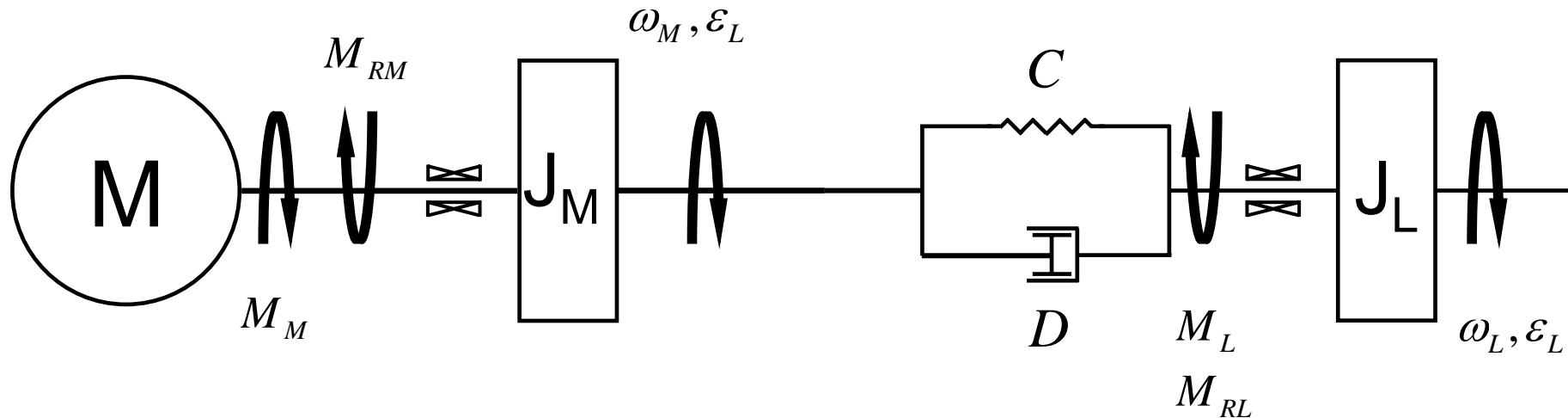
## Konventionelle Regelung im Falls eines Zweimassensystems

- Verhalten der Kaskadenregelung bei elastischer Kopplung



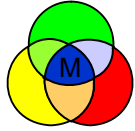


## Modell des Zweimassensystems ohne Lose

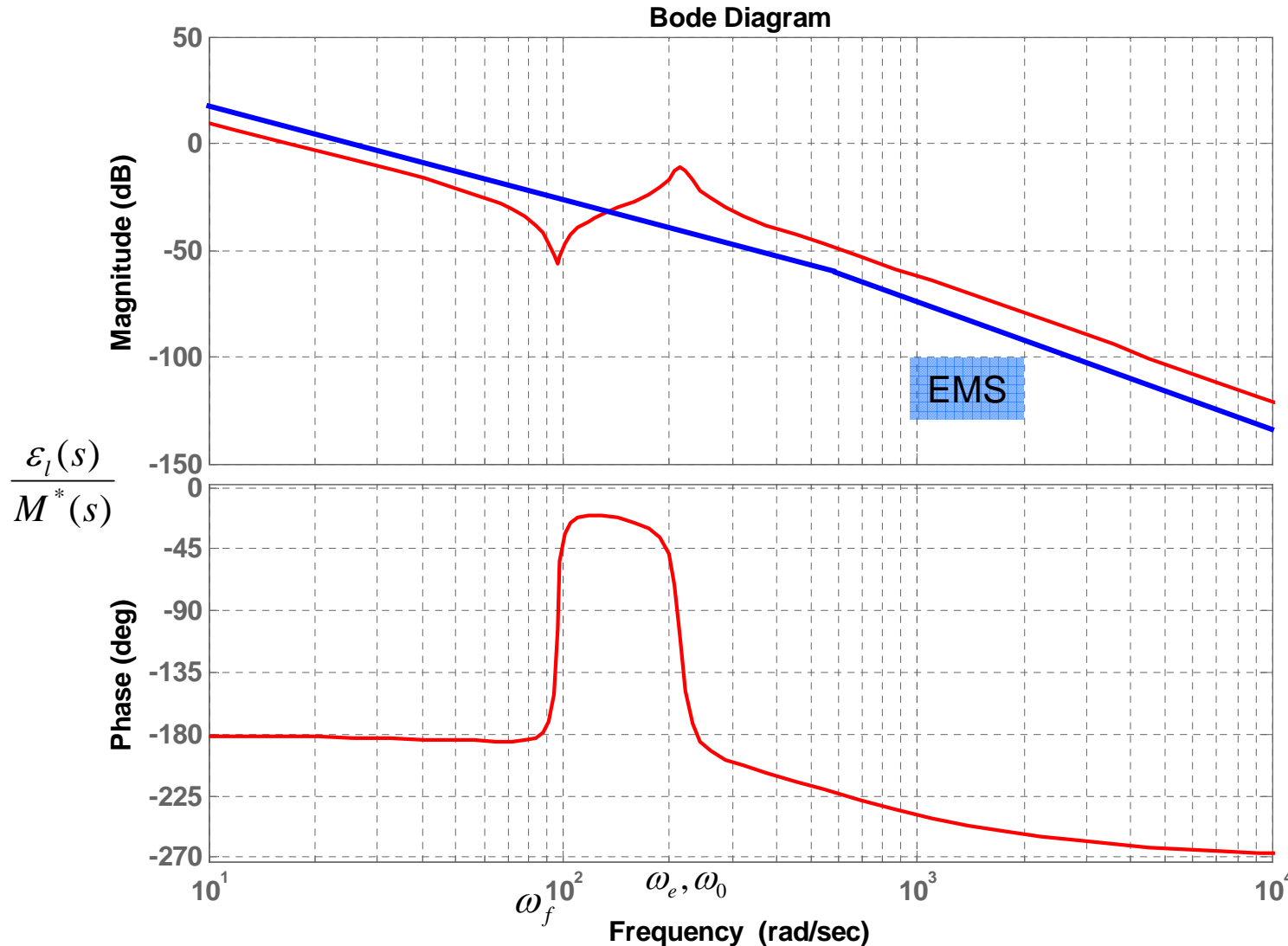


$$\begin{bmatrix} \dot{\varepsilon}_M \\ \dot{\varepsilon}_L \\ \dot{\omega}_M \\ \dot{\omega}_L \\ \dot{M}_M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{c}{J_M} & \frac{c}{J_M} & -\frac{d}{J_M} & \frac{d}{J_M} & \frac{1}{J_M} \\ \frac{c}{J_L} & -\frac{c}{J_L} & \frac{d}{J_L} & -\frac{d}{J_L} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{T_{em}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_M \\ \varepsilon_L \\ \omega_M \\ \omega_L \\ M_M \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ \frac{1}{T_{em}} \end{bmatrix} \cdot M^* = \mathbf{A} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{B} \cdot u$$

(Reibung vernachlässigt)



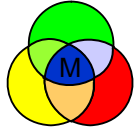
# Frequenzgang des Zweimassensystems



$$\omega_0 = \sqrt{\frac{C \cdot J_\Sigma}{J_M \cdot J_L}}$$

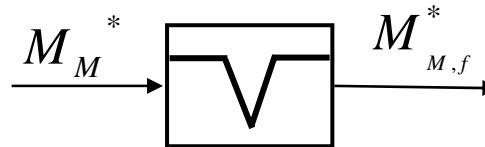
$$\omega_e = \omega_0 \sqrt{1 - D^2}$$

$$\omega_f = \sqrt{\frac{C}{J_L}}$$

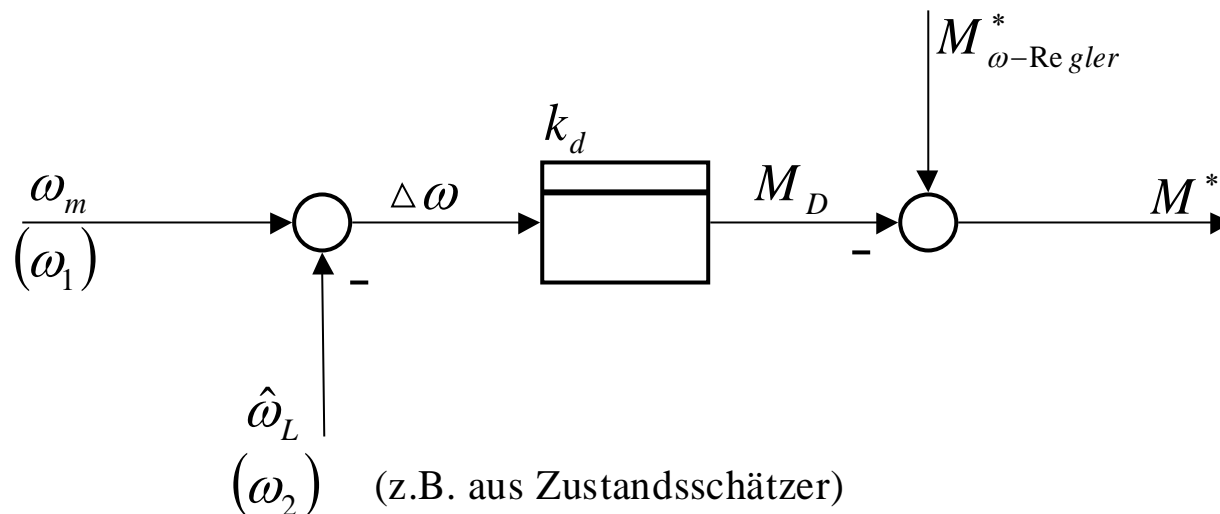


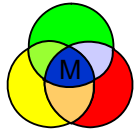
## Regelungskonzepte für Zweimassensystem (Auswahl)

- Sperrfilter im Vorwärtszweig zur Vermeidung der Resonanzanregung



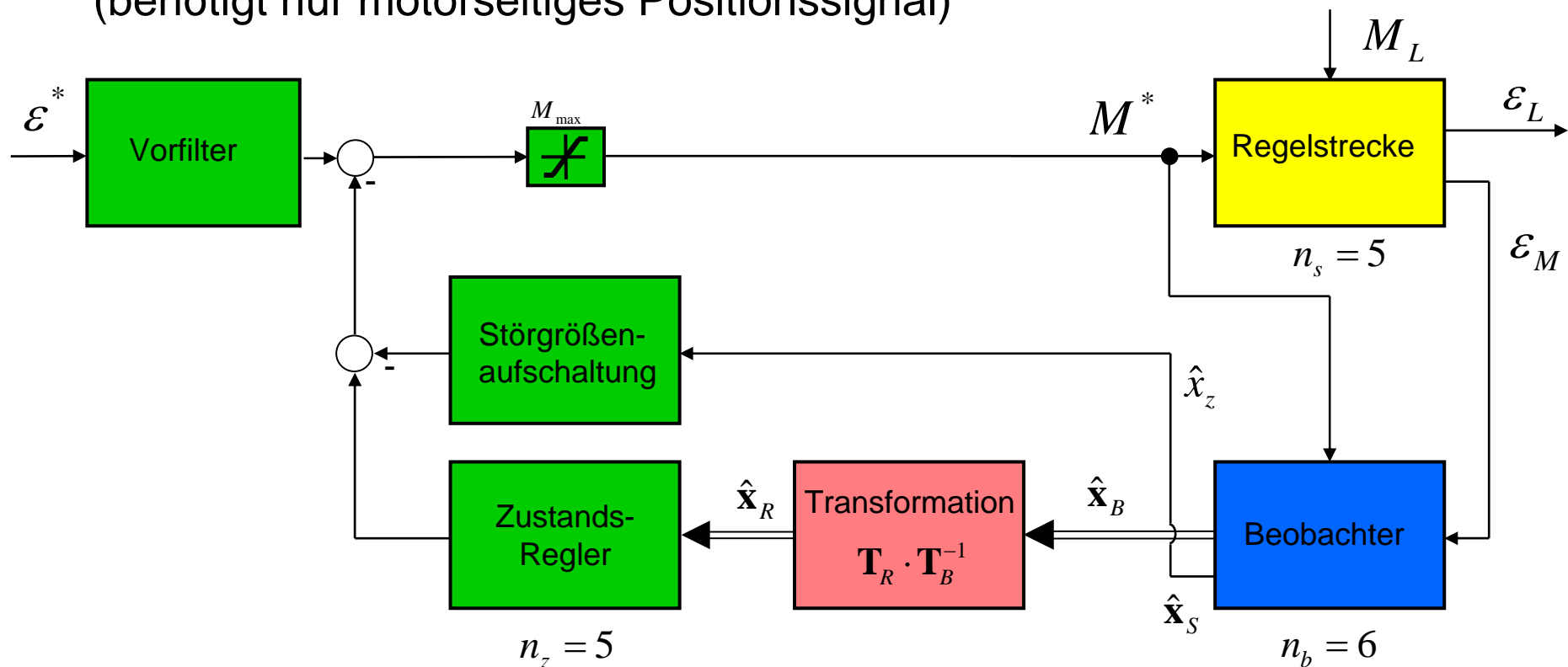
- Drehzahldifferenzenschaltung zur Dämpfung der Eigenschwingung



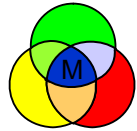


## Zustandsregelung für Zweimassensystem (1)

- Zustandsregelung mit Störgrößenbeobachter und –aufschaltung  
(benötigt nur motorseitiges Positionssignal)

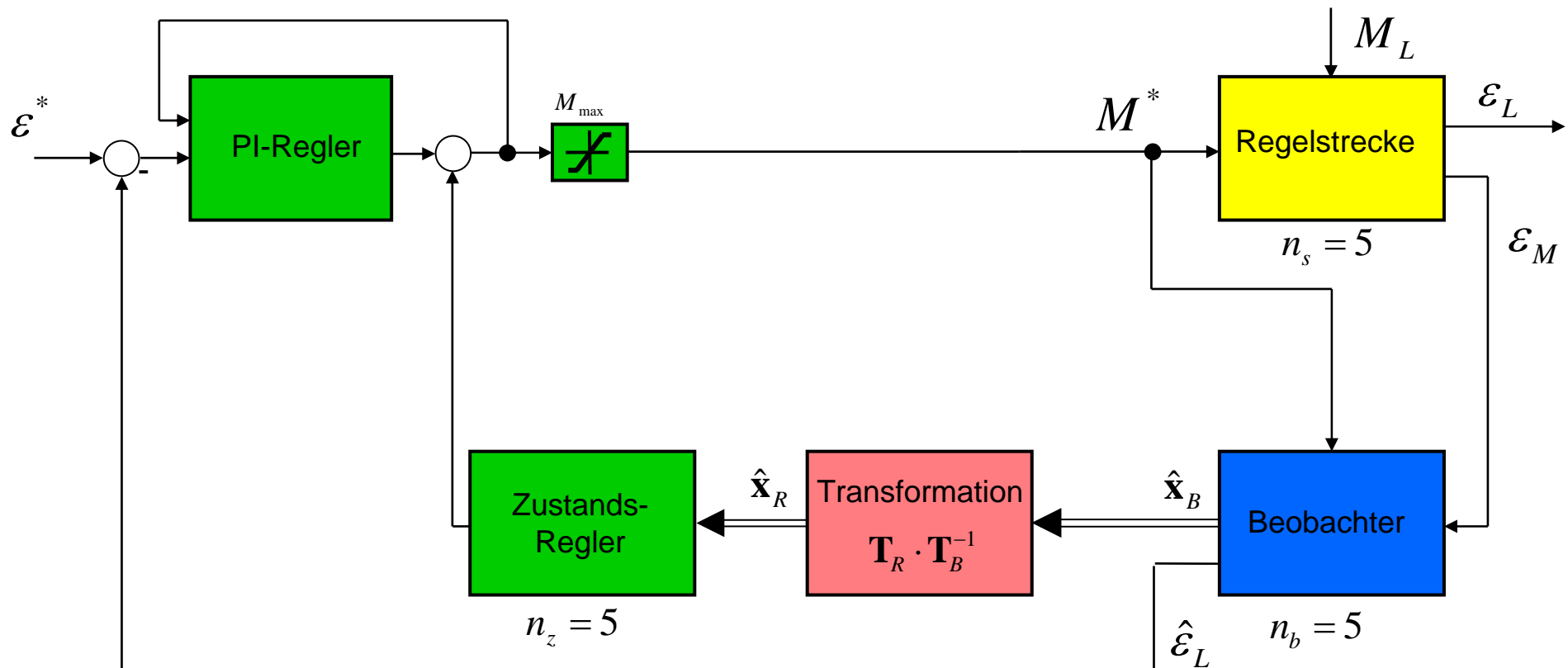


Binomialverhalten (reelle Pole) für überschwingungsfreies Einschwingen

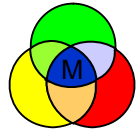


## Zustandsregelung für Zweimassensystem (2)

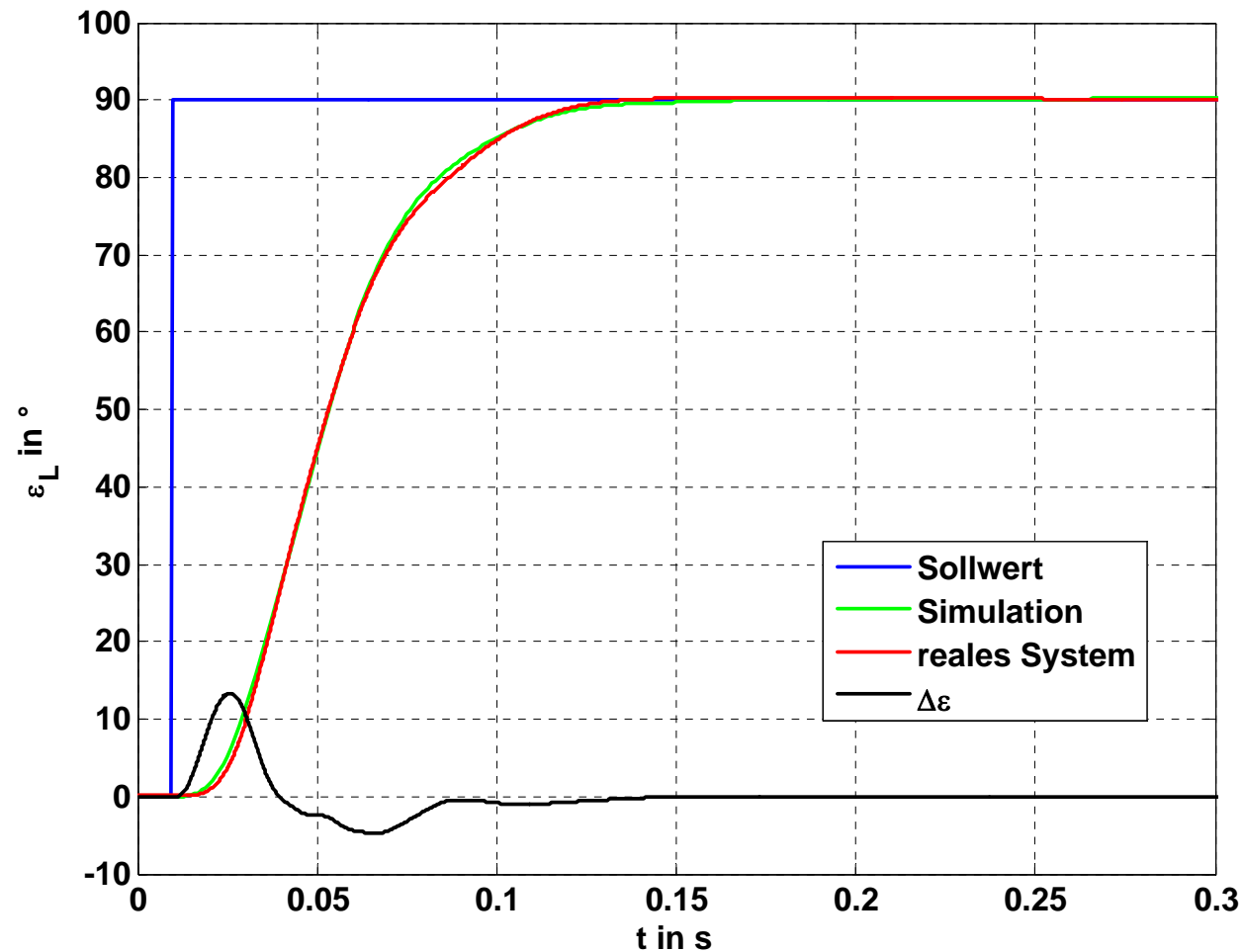
- PI-Zustandsregelung (benötigt nur motorseitiges Positionssignal)

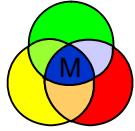


Binomialverhalten (reelle Pole) für überschwingungsfreies Einschwingen

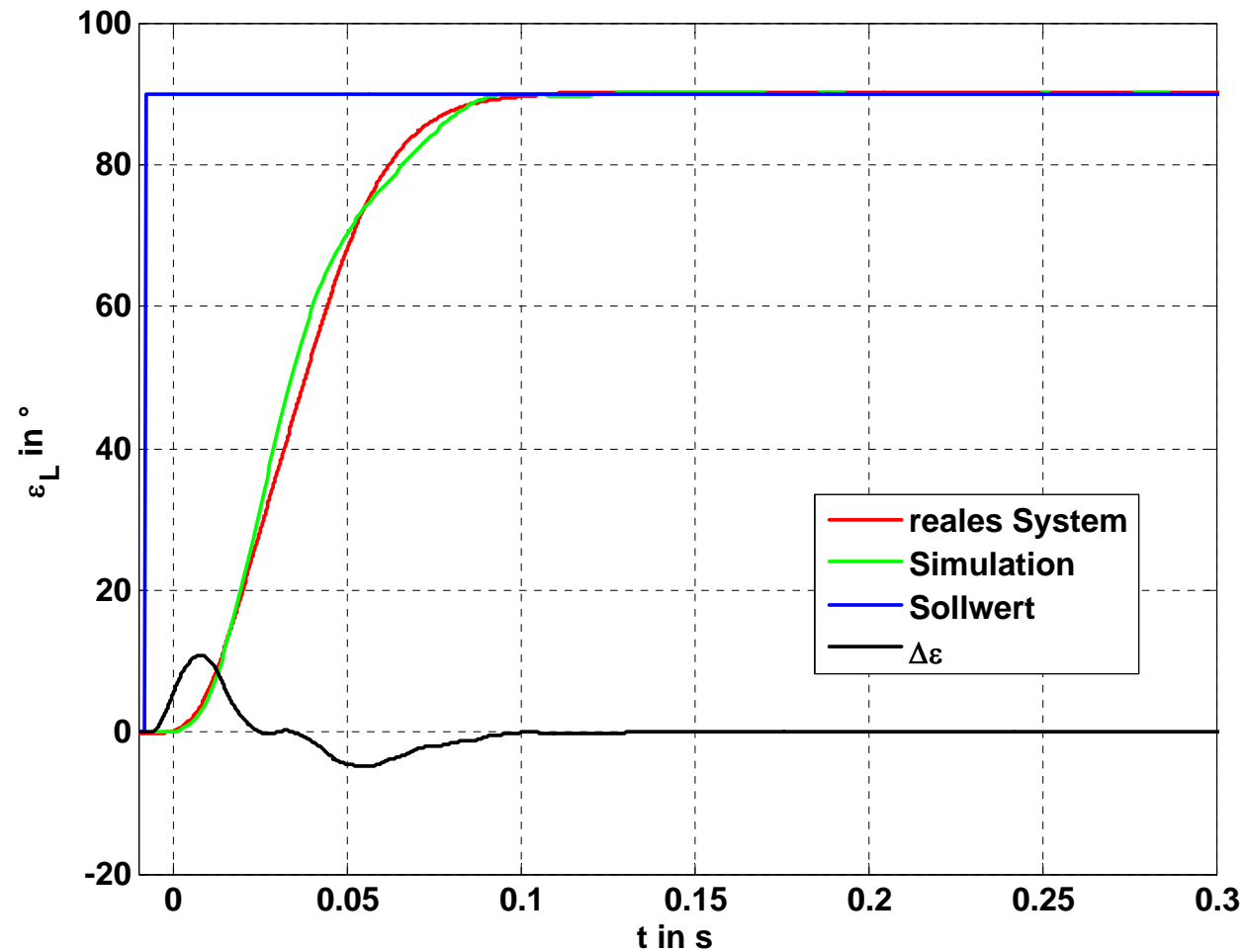


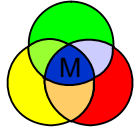
## Führungsverhalten der Zustandsregelung mit Störgrößenaufschaltung



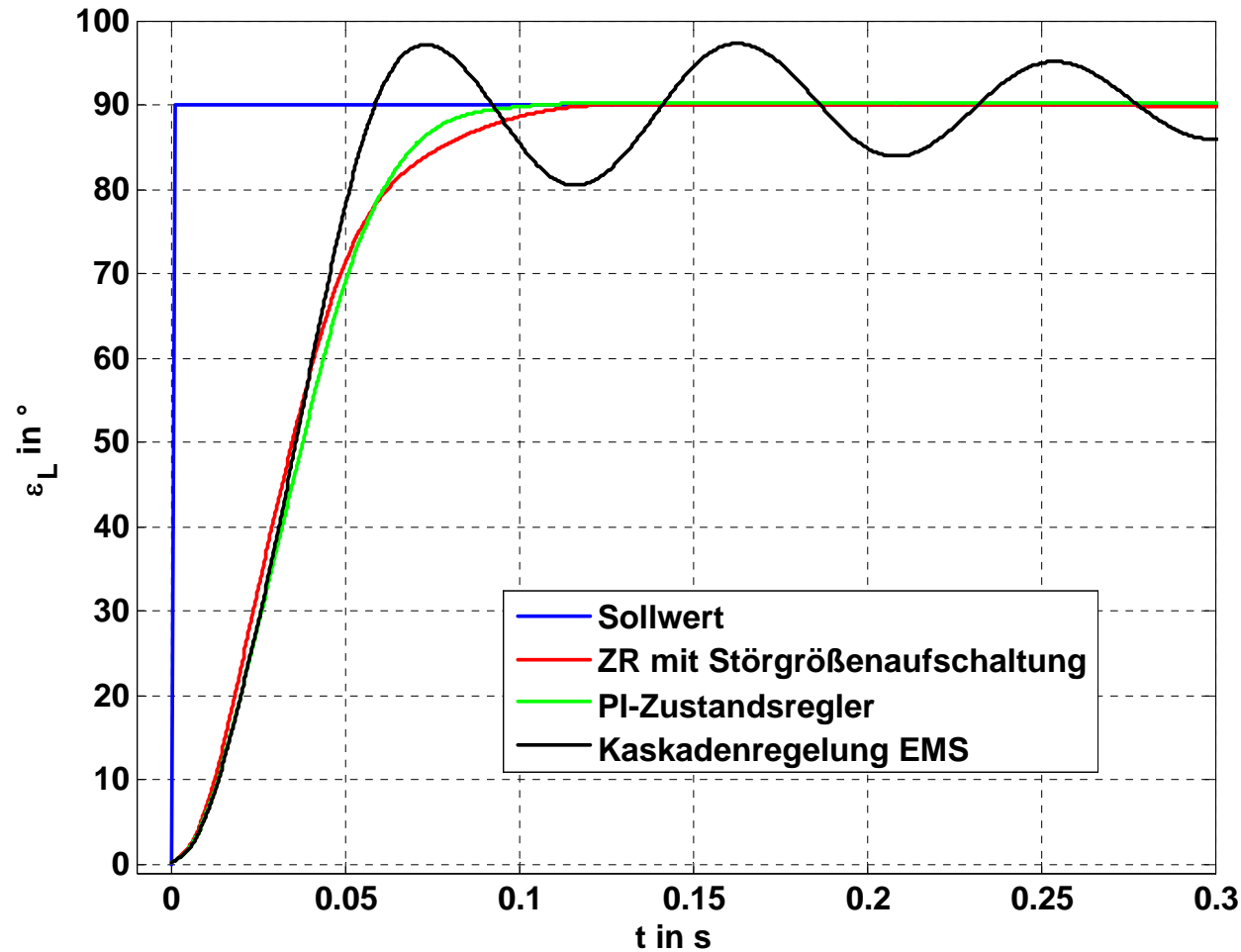


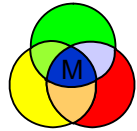
# Führungsverhalten der PI-Zustandsregelung



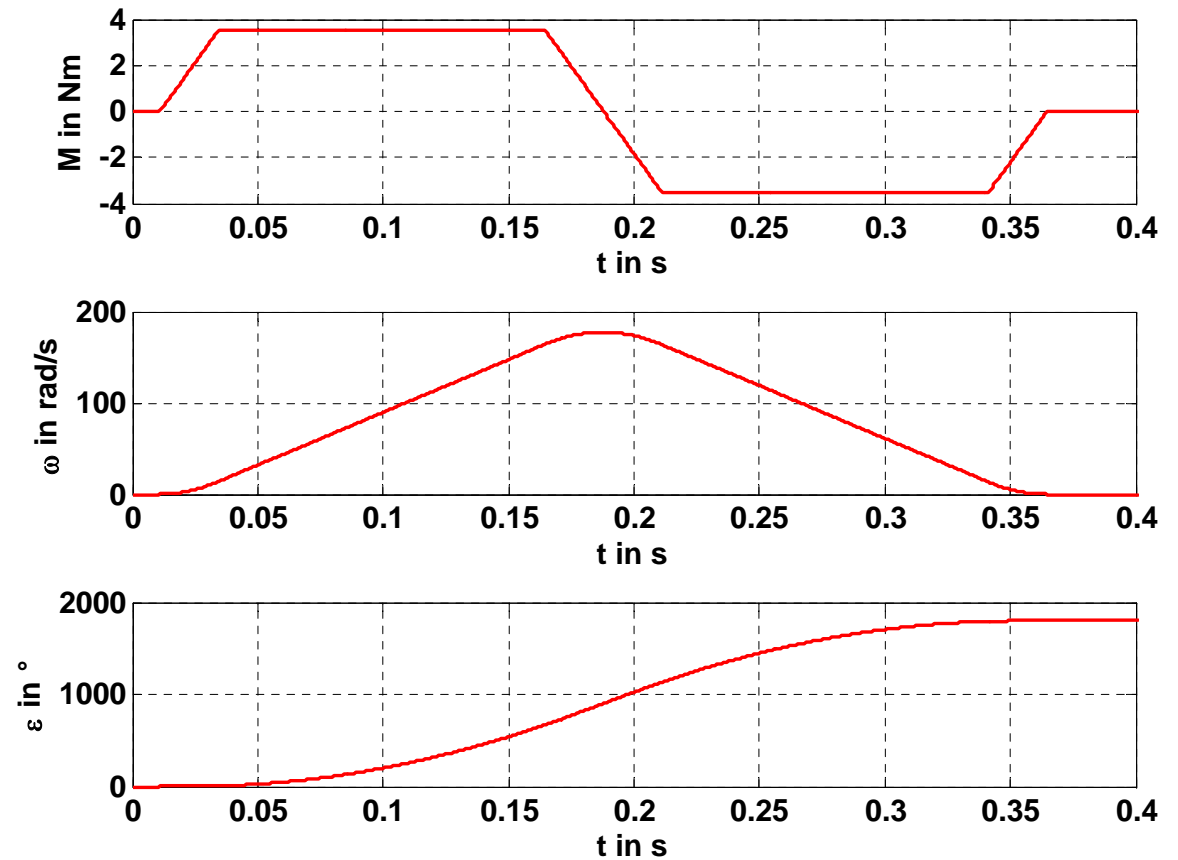
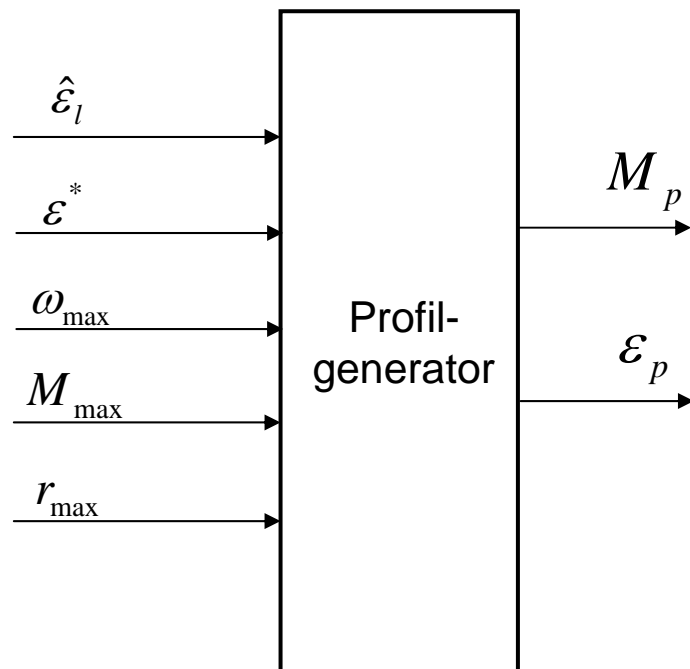


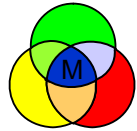
## Führungsverhalten der untersuchten Regelungen im Vergleich



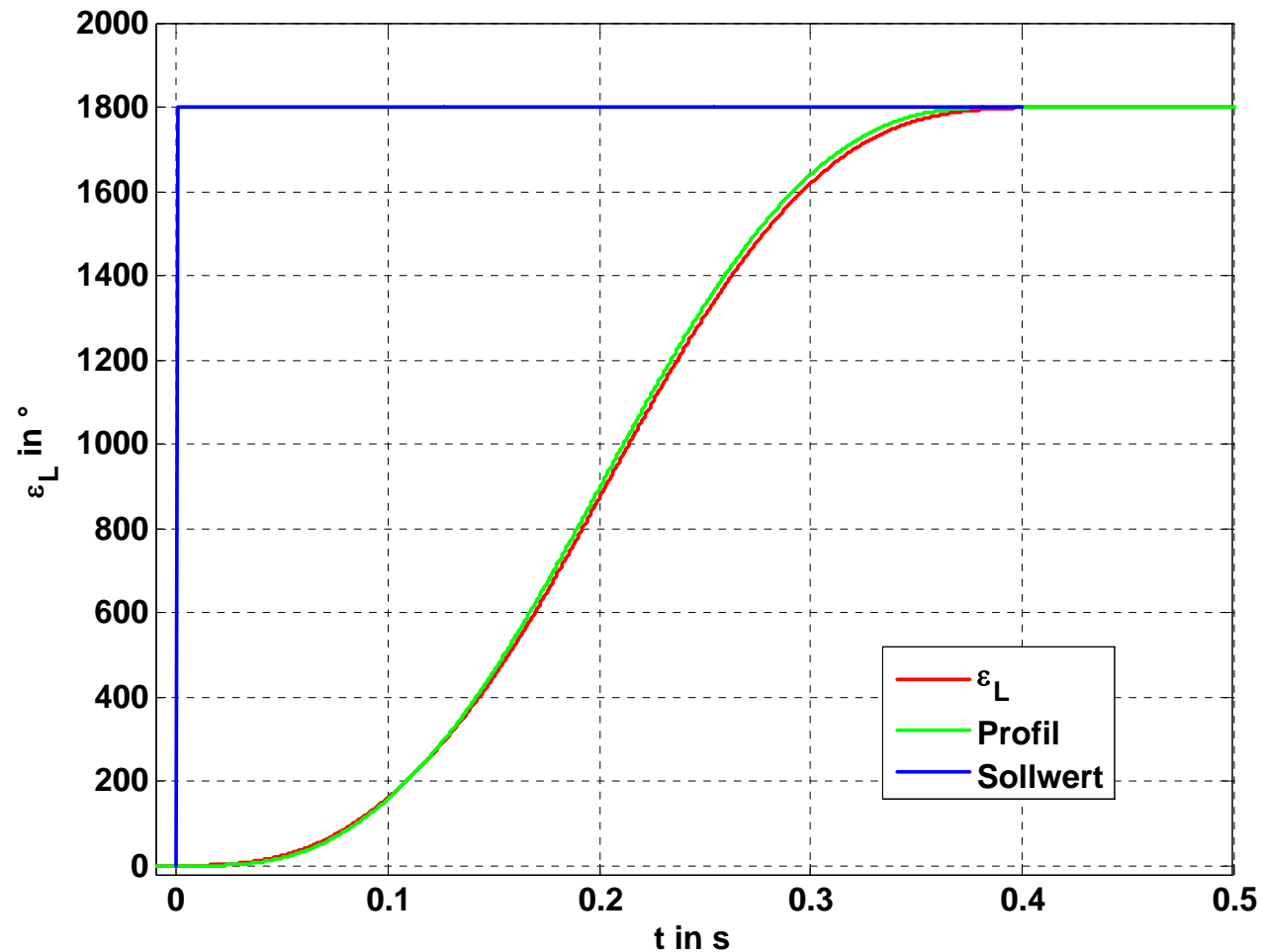


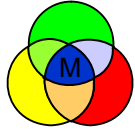
# Positionierung im Großsignalbereich mit Vorsteuerung





## Großsignalverhalten der Zustandsregelung mit Vorsteuerung



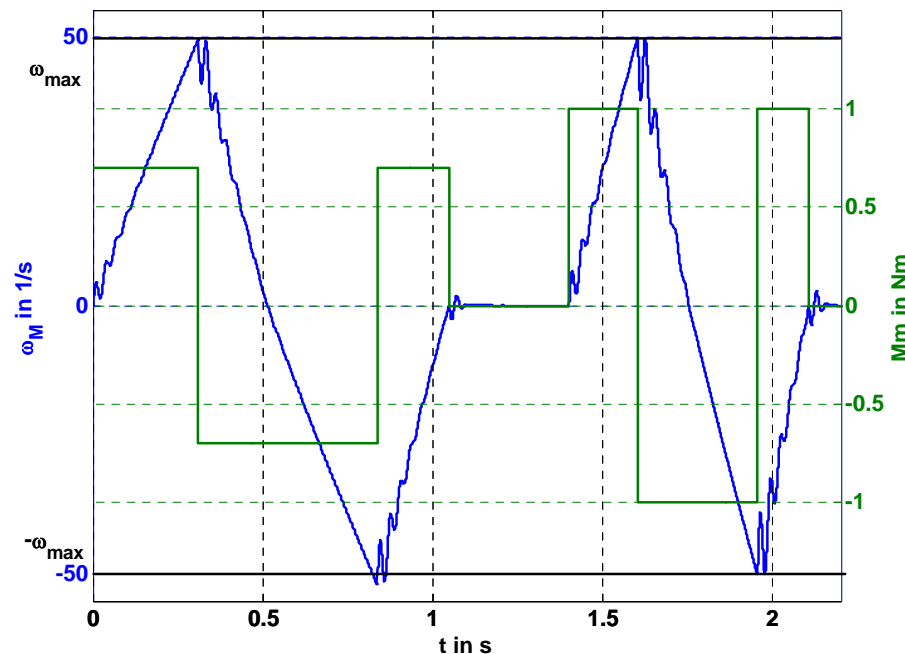


## Parameteridentifikation des Zweimassensystems

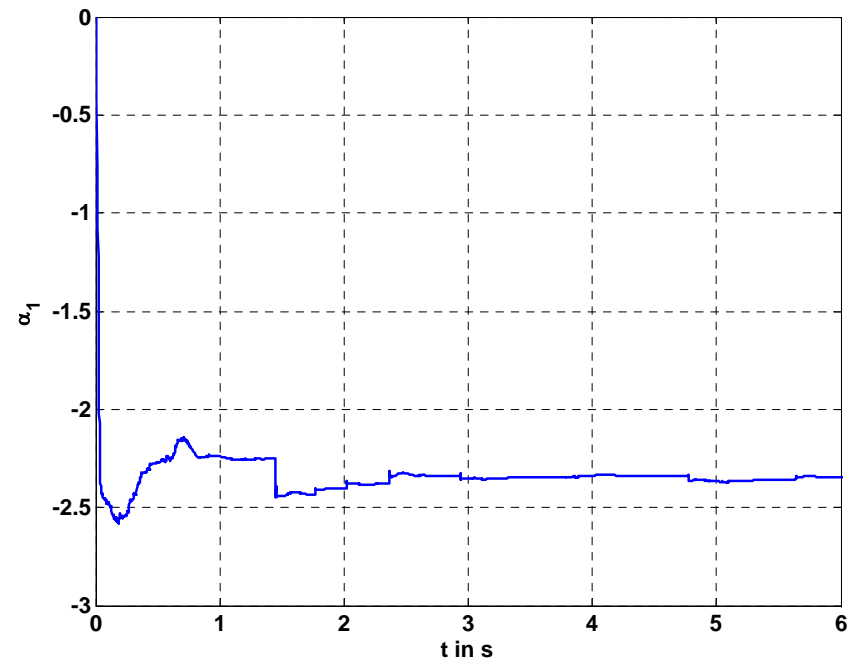
### Anwendung des RLS-Verfahrens (Online-Identifikation möglich)

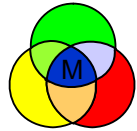
- Vernachlässigung der trockenen Reibung
- Testsignal: drehzahlabhängiges Anregungssignal (DAA)

Anregungssignal DAA



Konvergieren eines identifizierten Parameters:





## Ergebnisse der Parameteridentifikation mit RLS-Verfahren

Parameter		Istwerte (aus Einzelmessungen)	Identifizierte Werte (Simulation)	Identifizierte Werte (reales System)	Abweich- ung in %
Bezeichnung	Größe				
motorseitiges Massenträgheit	$J_M$	$6,755 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$	$6,996 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$	$6,61 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$	2,1
lastseitiges Massenträgheit	$J_L$	$27,41 \cdot 10^{-4} \cdot \text{kgm}^2$	$27,6 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$	$24,3 \cdot 10^{-4} \text{ kgm}^2$	11,3
Summenzeitkonstante	$T_\Sigma$	1,687 ms	1,718 ms	1,718 ms	2
Federsteifigkeit	$c$	$24,12 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$	$25,24 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$	$25,5 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$	5,7
Dämpfung (dimensionslos)	$D$	0,002	0,002	0,002	0

### Ausblick

- **Approximative Berücksichtigung der trockenen Reibung**
- **Anwendung geeignete Verfahren für Prozessrauschen wie IV4-Verfahren**
- **Automatisierte Inbetriebnahme der Antriebsregelung**