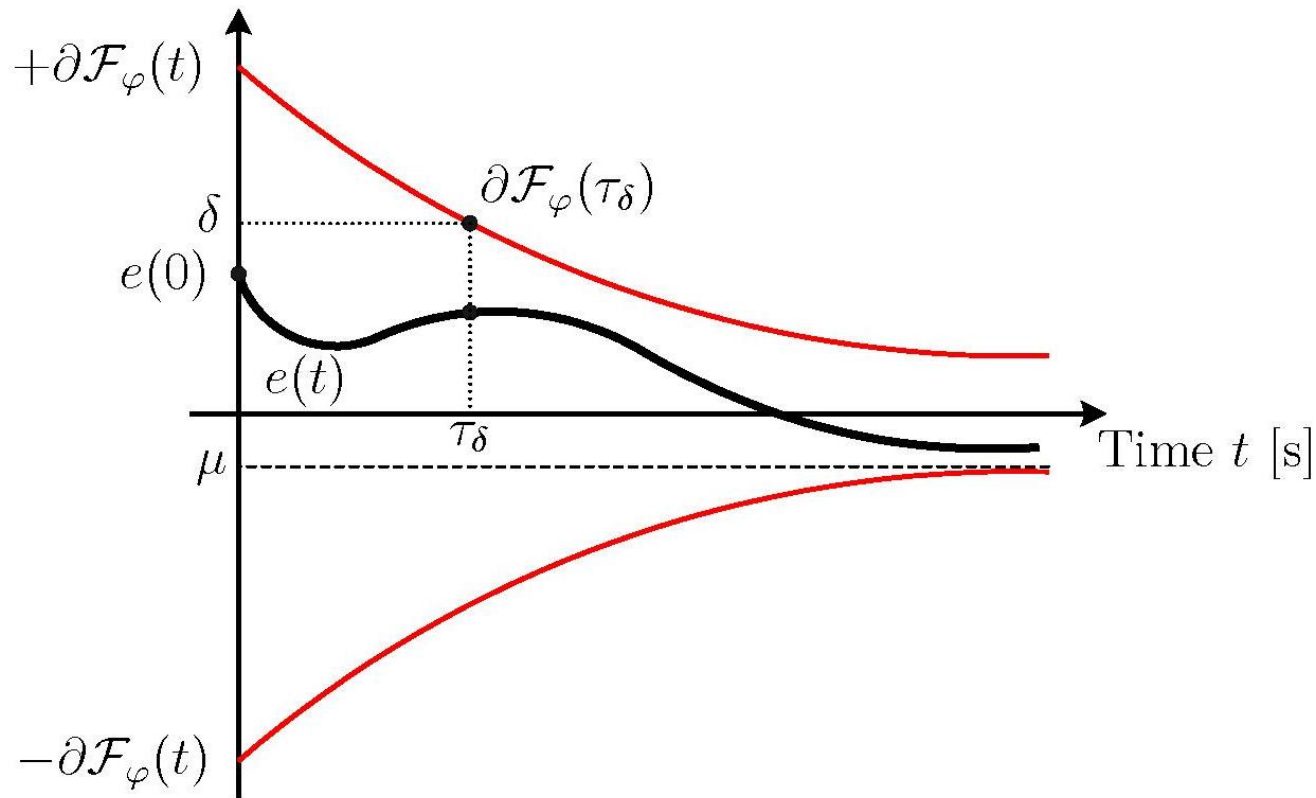


Nicht-Modellbasierte adaptive Regelung „Funnel-Control“ – Einführung und mögliche Anwendung –

Christoph Hackl



Funnel-
Control

Erweiterun-
gen für FC

Anwendun-
gen

Ausblick

Gliederung

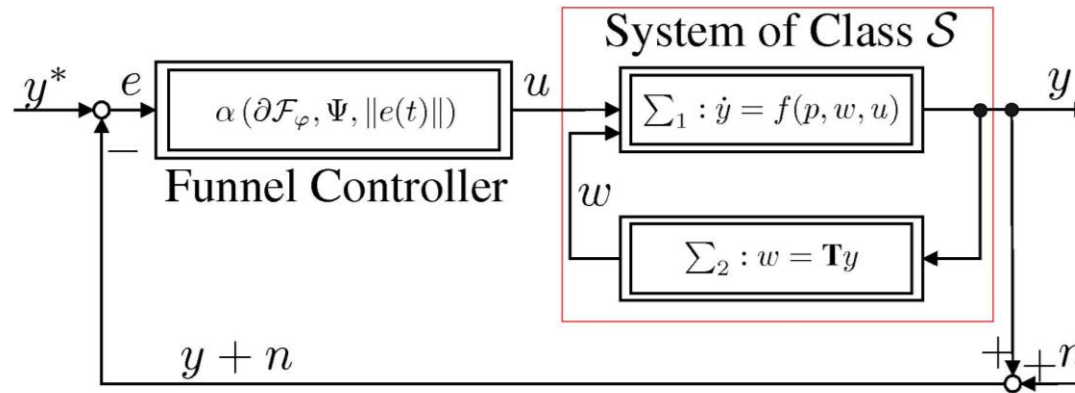
1. Funnel-Control (FC)
- Grundlegende Idee und Systemklasse –
2. Erweiterungen für Funnel-Control
 - a) Stationäre Genauigkeit (PI)
 - b) Kompensation bei Stellgrößenbeschränkung (SIC)
 - c) Aktive Bedämpfung (PSI)
3. Mögliche Anwendungen
 - a) Zwei-Massen-System
 - b) Manutec R3 Roboter
4. Zusammenfassung und Ausblick

1. Funnel-Control

Grundlegende Idee und Systemklasse

1. Funnel-Control – Regelkreis

(entwickelt von Ilchmann et al.)



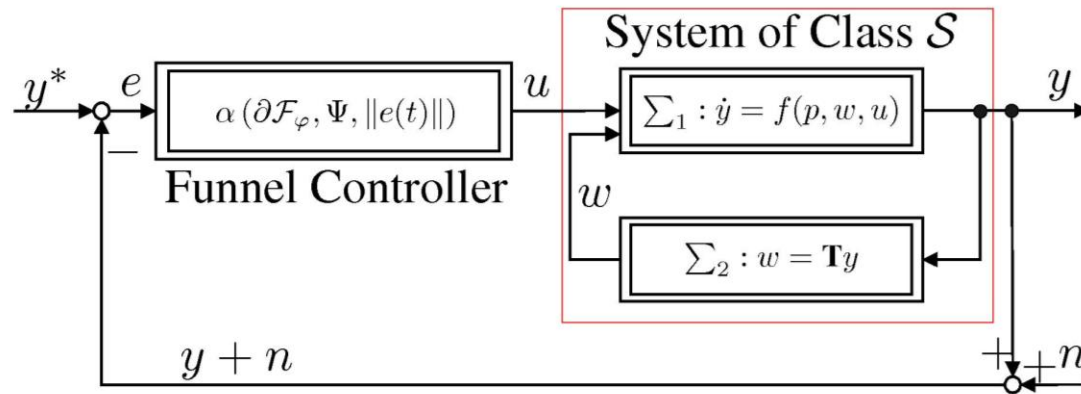
Block Diagramm – System der Klasse $\mathcal{S}$ mit Funnel Controller

Reglereigenschaften:

- Proportionaler Regler
- Adaptive (zeitvariante) Verstärkung
- Regelgesetz:

$$u(t) = \alpha(\partial \mathcal{F}_\varphi(t), \Psi(t), \|e(t)\|) \cdot e(t)$$

1. Funnel-Control – Regelkreis



Block Diagramm – System der Klasse $\mathcal{S}$ mit Funnel Controller

System der Klasse $\mathcal{S}$ - Eigenschaften:

- Relativer Grad von

$$r = 1$$

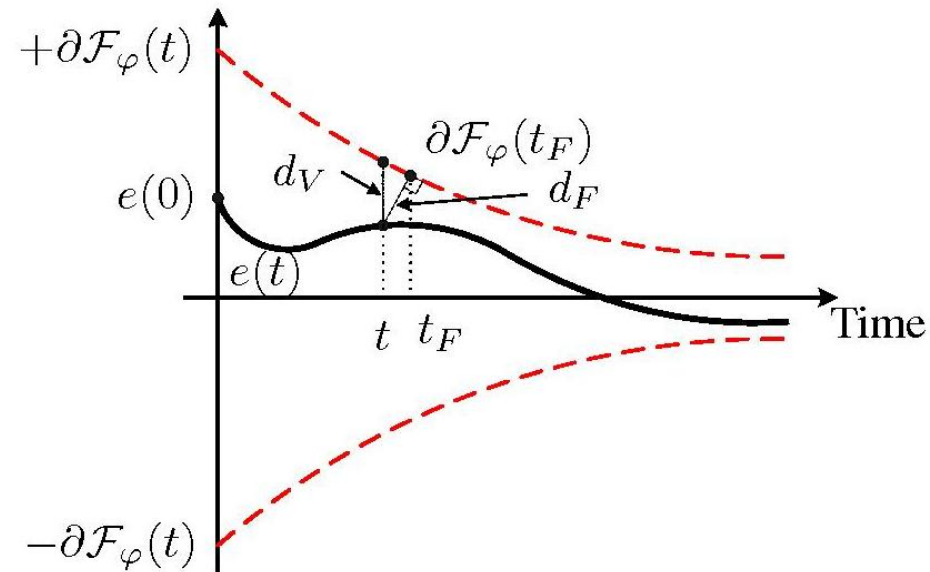
- minimalphasig bzw. stabile Nulldynamik

$$\max_y \|w\| < \infty$$

- Bekanntes (positives) High-Frequency Gain

$$\|u_n\| \rightarrow \infty \text{ für } n \rightarrow \infty \Rightarrow \min_{(p,w) \in \mathcal{C}} \frac{\langle u_n, f(p, w, u_n) \rangle}{\|u_n\|} \rightarrow \infty$$

1. Funnel-Control – Adaption der Reglerverstärkung



Fehlverlauf innerhalb des Trichters

Adaption der Reglerverstärkung abhängig von der (vertikalen oder zukünftigen) Distanz:

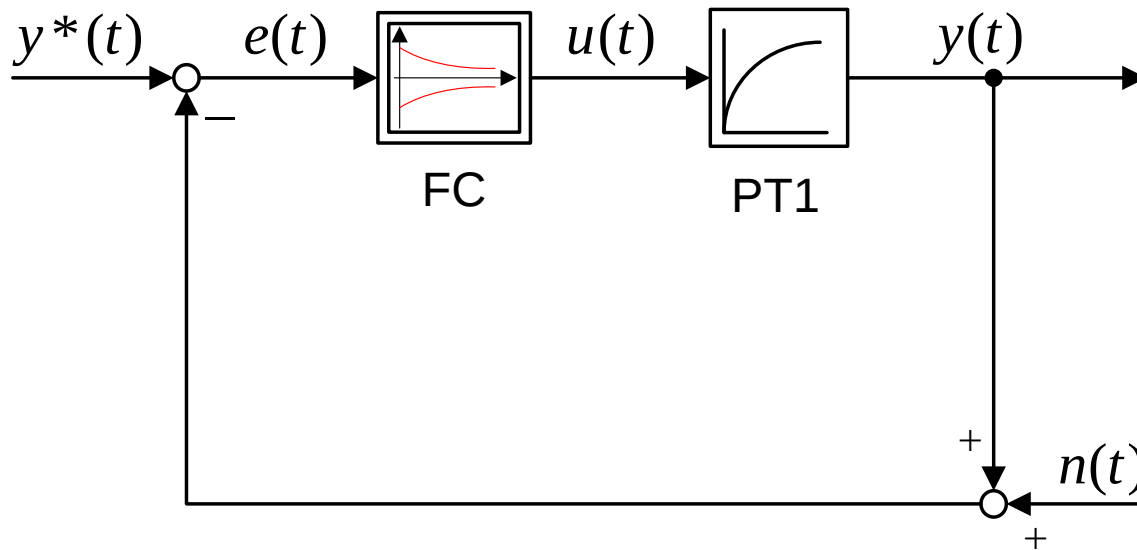
$$\alpha_D(t) = \frac{1}{\text{dist}(\partial\mathcal{F}_\varphi(\cdot), \|e(t)\|)}$$

- geringer Abstand => hohe Verstärkung
- großer Abstand => kleine Verstärkung

Skalierte zeitvariante Verstärkung:

$$\alpha(\partial\mathcal{F}_\varphi(t), \Psi(t), \|e(t)\|) = \Psi(t) \cdot \alpha_D(t) \text{ mit } \Psi(t) \geq 1 \quad \forall t > 0$$

1. Beispielsystem PT1: Regelkreis FC+PT1 mit Messrauschen



Block Diagramm – Regelkreis aus PT1 und Funnel Controller

Beispielsystem:

$$F_{PT_1}(s) = \frac{2}{1+s2}$$

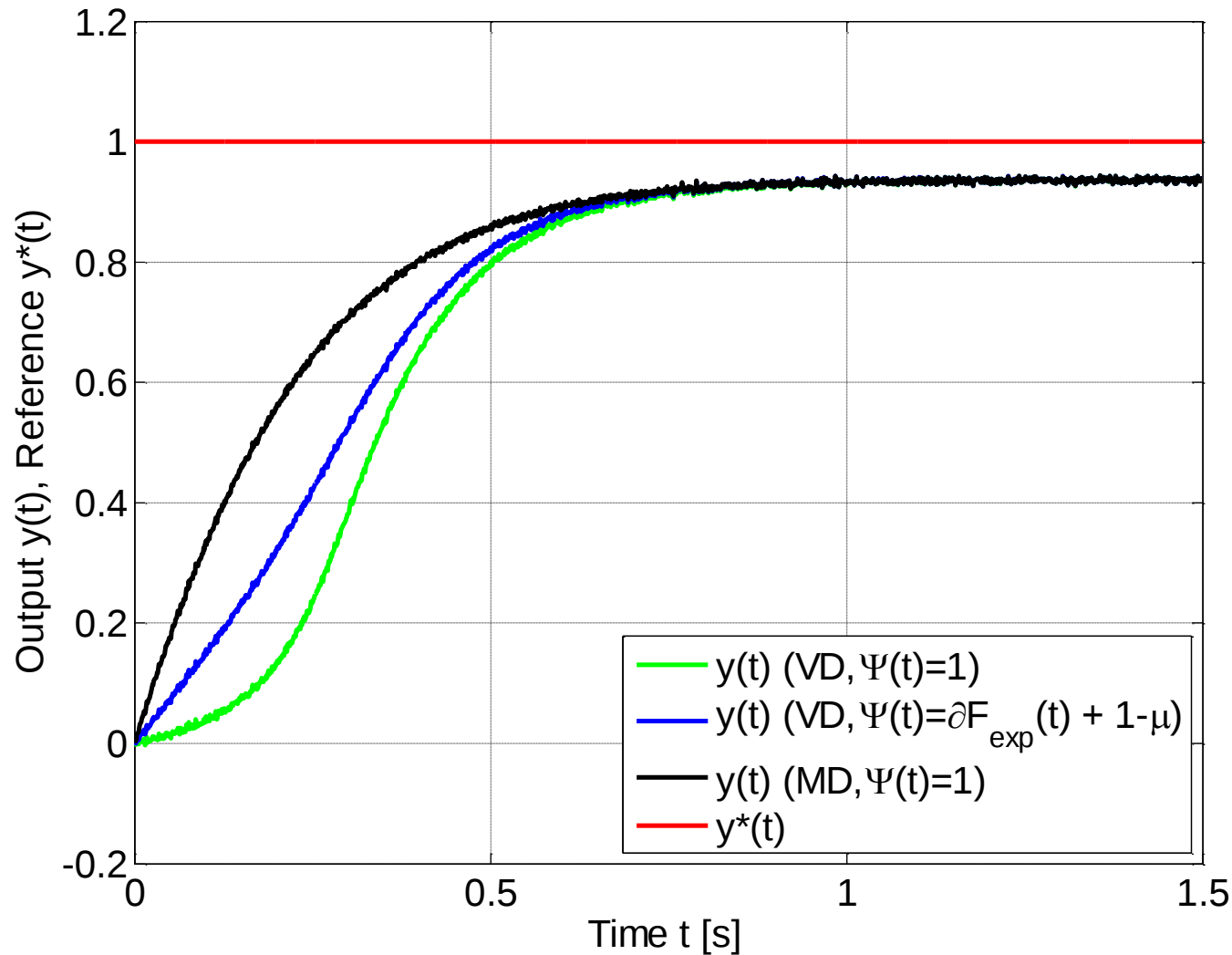
Trichterrand und Skalierungsfunktion:

$$\partial \mathcal{F}_{\text{exp}}(t) = 4.8 \cdot \exp\left(-\frac{t}{0.144}\right) + 0.2$$

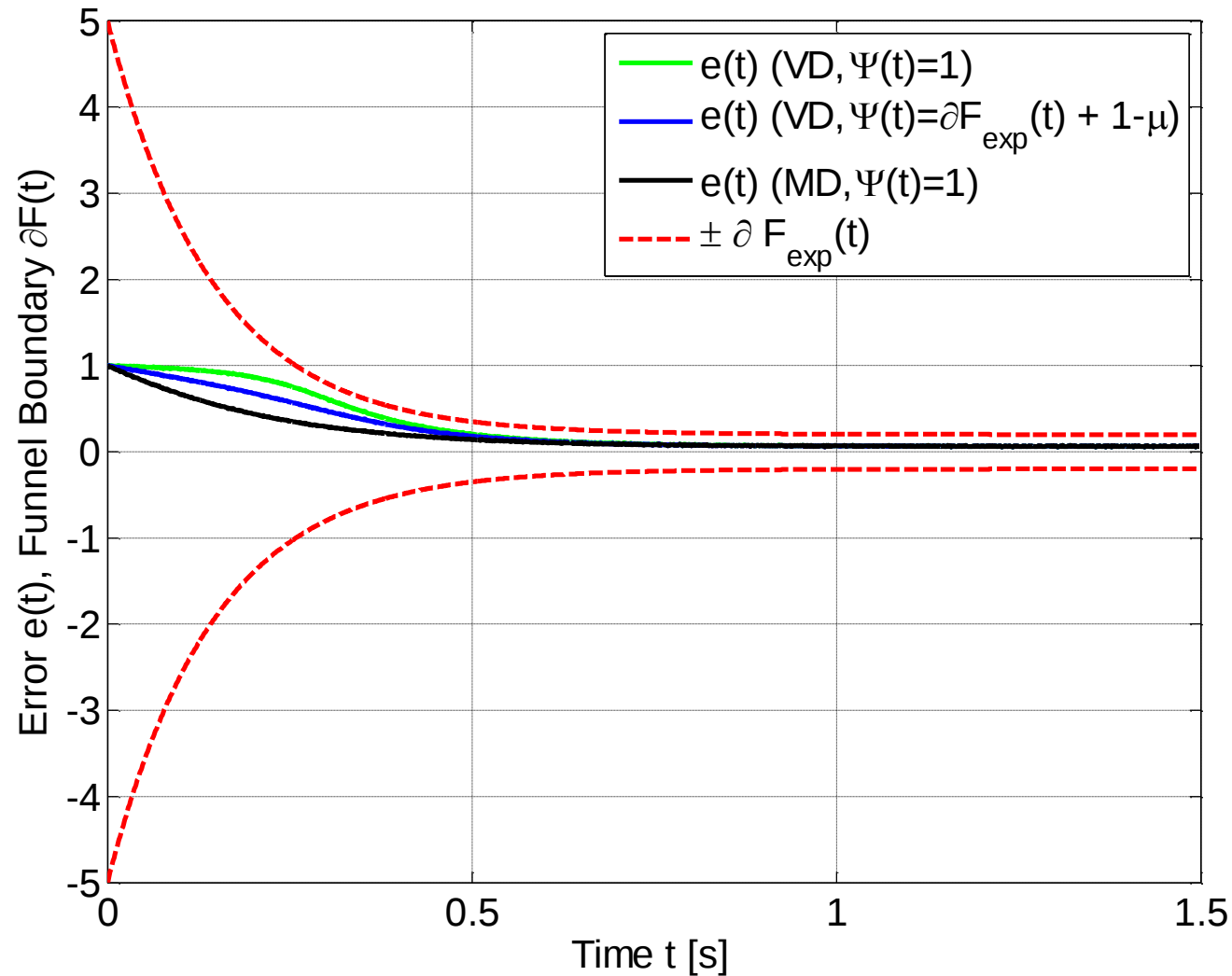
$$\Psi_1(t) = 1$$

$$\Psi_2(t) = \partial \mathcal{F}_{\text{exp}}(t) + (1 - 0.2)$$

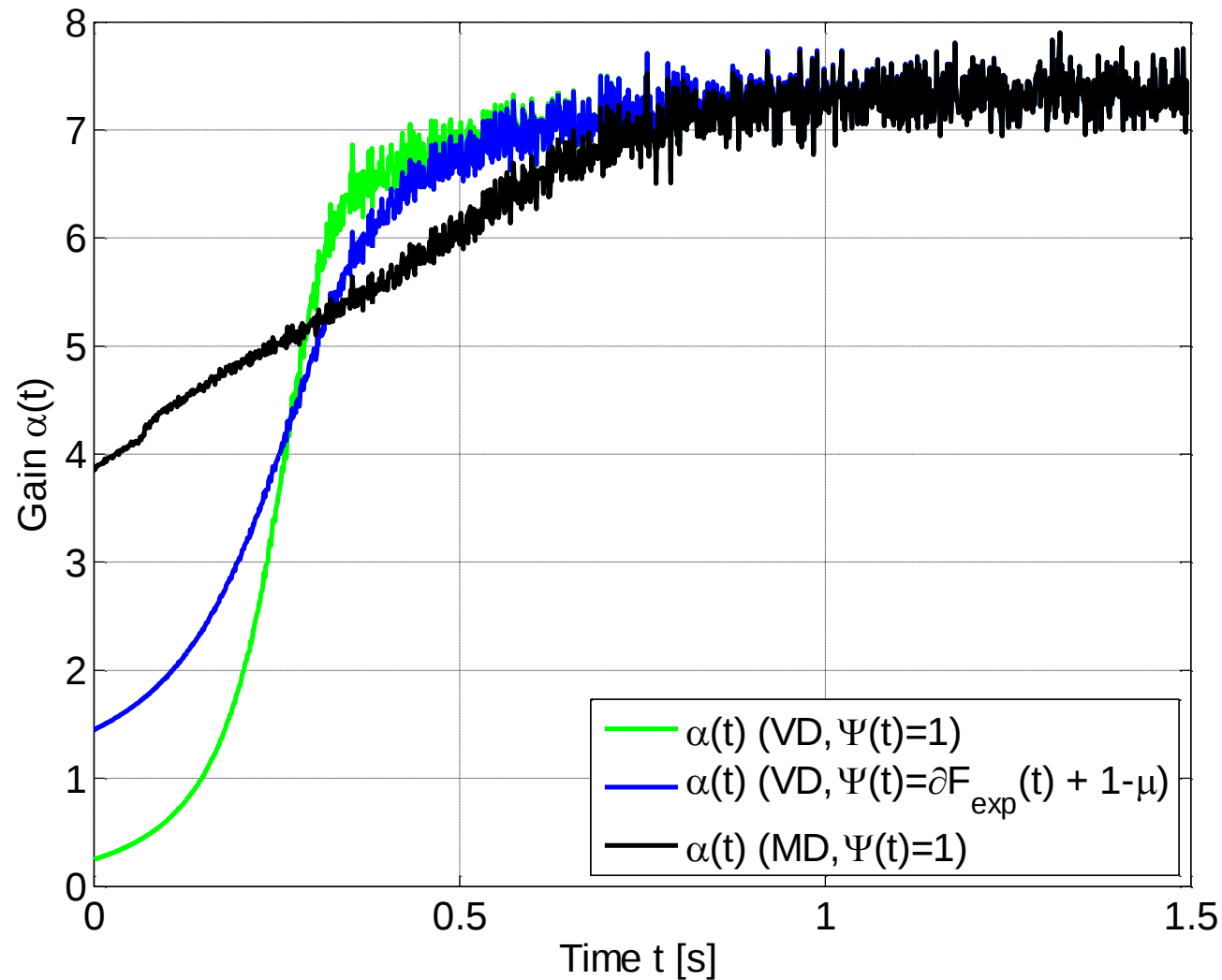
1. Simulationsergebnisse PT1: Ausgang $y(t)$



1. Simulationsergebnisse PT1: Fehler $e(t)$ & Trichterrand $\partial F(t)$



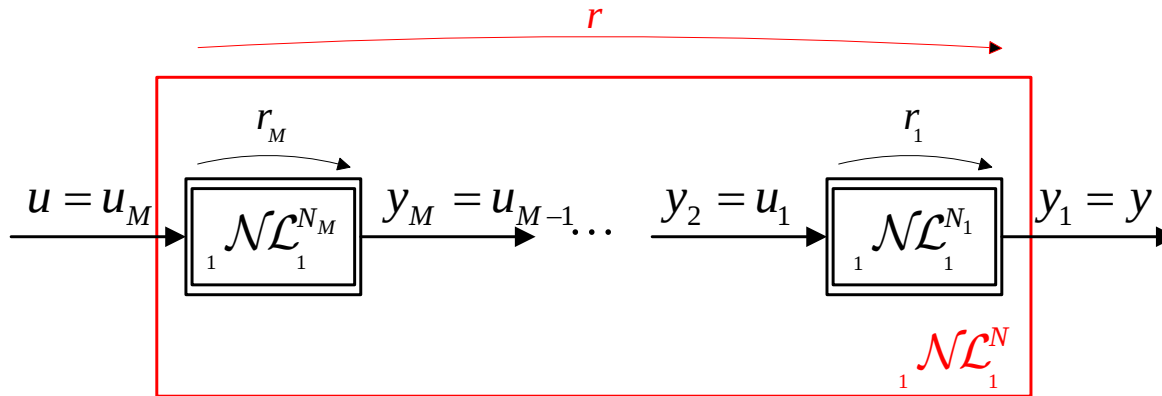
1. Simulationsergebnisse PT1: Verstärkung $\alpha(t)$



2. Erweiterungen für Funnel-Control

- a) **Stationäre Genauigkeit (PI)**
- b) Kompensation bei Stellgrößenbeschränkungen (SIC)
- c) Aktive Bedämpfung (PSI)

2.a Summe des Relativgrades, Multiplikation des HFG



Serielle Verknüpfung von M nichtlinearen SISO Systemen

Eigenschaften des seriell verknüpften Gesamtsystems ${}_1\mathcal{NL}_1^N = {}_1\mathcal{NL}_1^{N_1} * \dots * {}_1\mathcal{NL}_1^{N_M}$:

- Systemordnung

$$N = \sum_{k=1}^M N_k$$

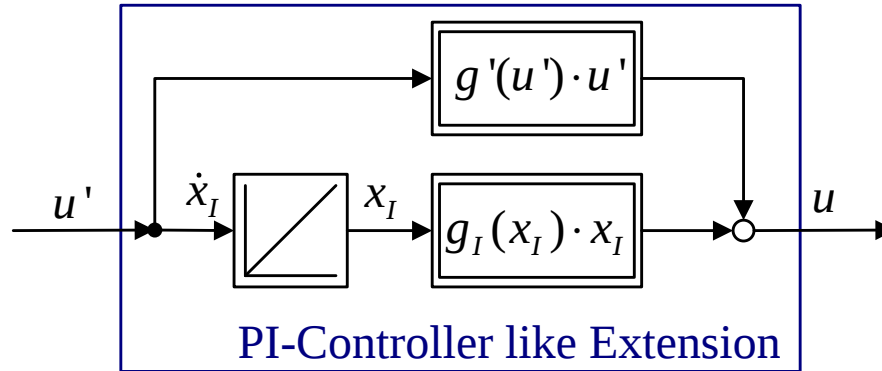
- Vorzeichen des HFG

$$\rho = \prod_{k=1}^M \rho_k$$

- Relativgrad

$$r = \sum_{k=1}^M r_k$$

2.a Nichtlineare PI-ähnliche Erweiterung (PI)



Nichtlineare PI-ähnliche Erweiterung $u' \rightarrow u$

Eigenschaften der Erweiterung mit $g'(u') > 0$ und $g_I(x_I) > 0$:

- Beschreibung
(mit Durchgriff)

$$\begin{aligned} u(t) &= g'(u'(t)) \cdot u'(t) + g_I(x_I(t)) \cdot x_I(t) \\ \dot{x}_I(t) &= u'(t) \end{aligned}$$

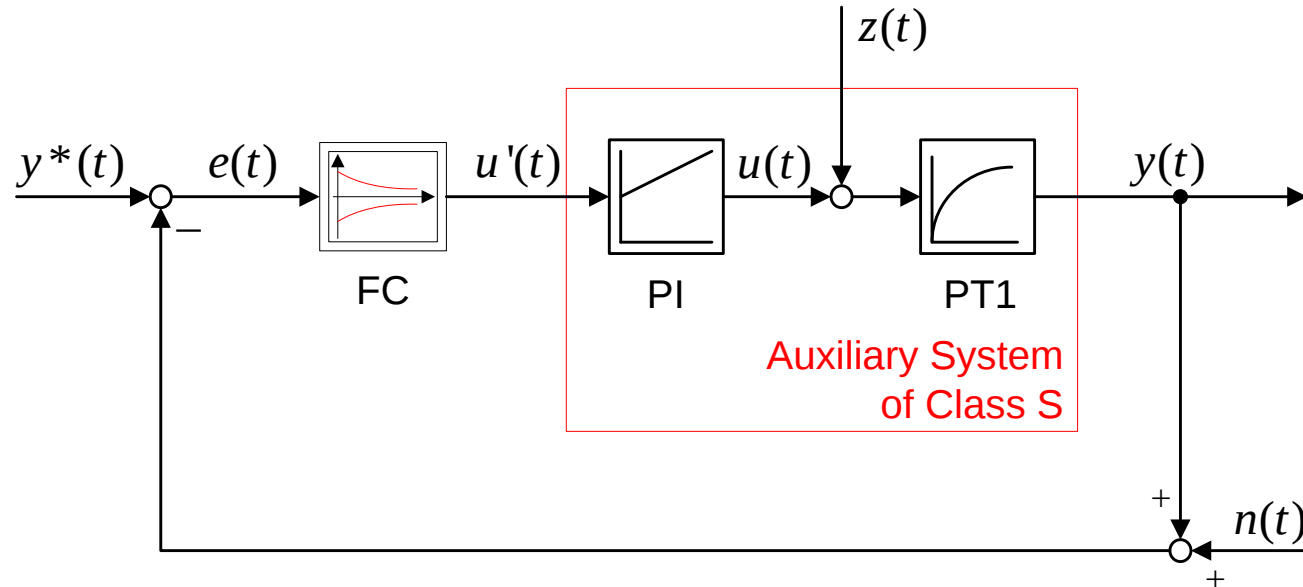
- Relativgrad

$$r_{PI} = 0$$

- Vorzeichen des HFG

$$\rho_{PI} = \text{sgn}(g'(u'(t))) > 0$$

2.a Beispielsystem PT1+PI: „Hilfssystem“ und FC Regelkreis



Regelkreis aus Beispielsystem mit Erweiterung (Hilfssystem: PI+PT1) und FC

Beispielsystem:

$$F_{PT_1}(s) = \frac{2}{1+s^2}$$

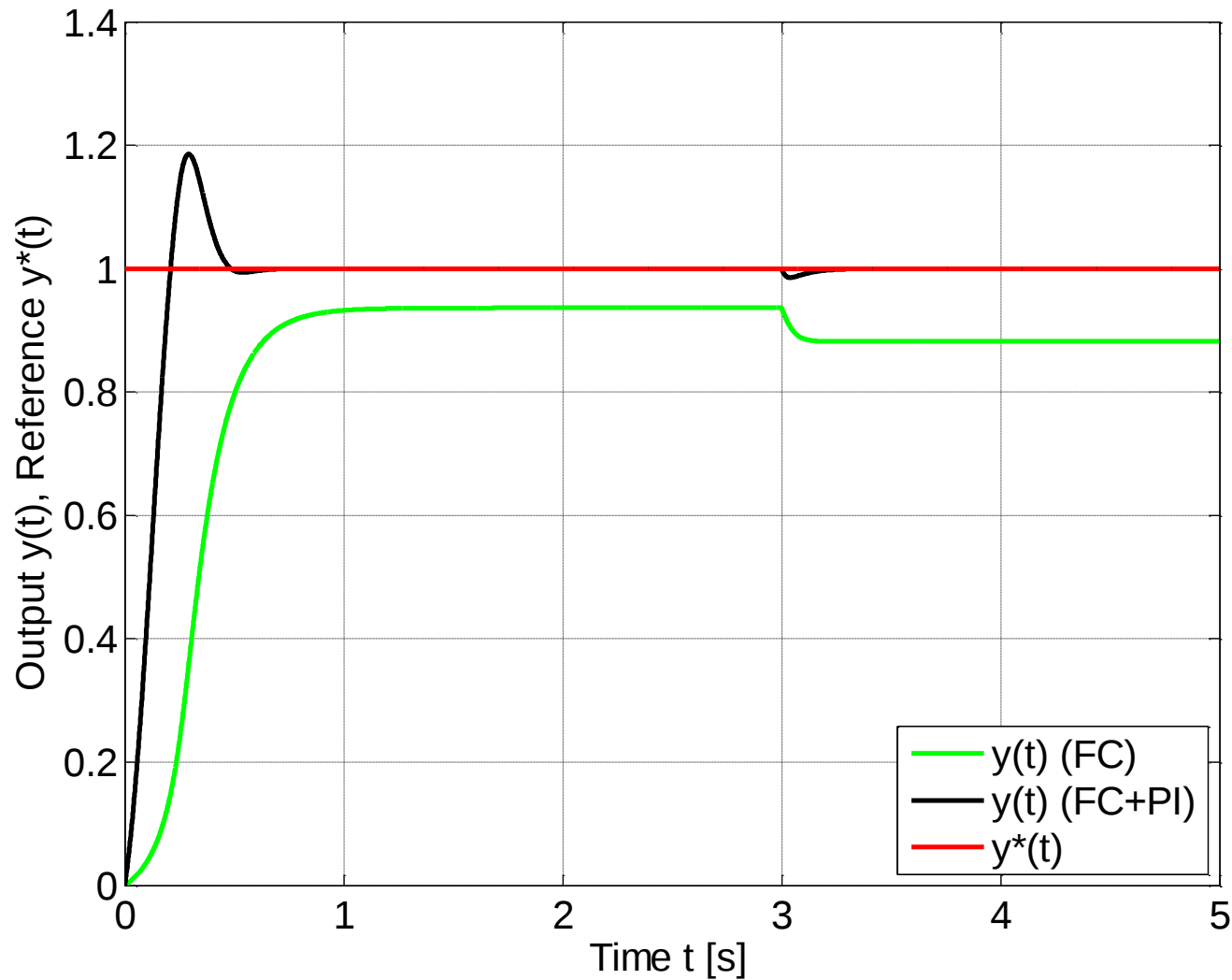
$$F_{PI}(s) = 10 \left(\frac{1+0.1s}{0.1s} \right)$$

Trichterrand und Skalierungsfunktion:

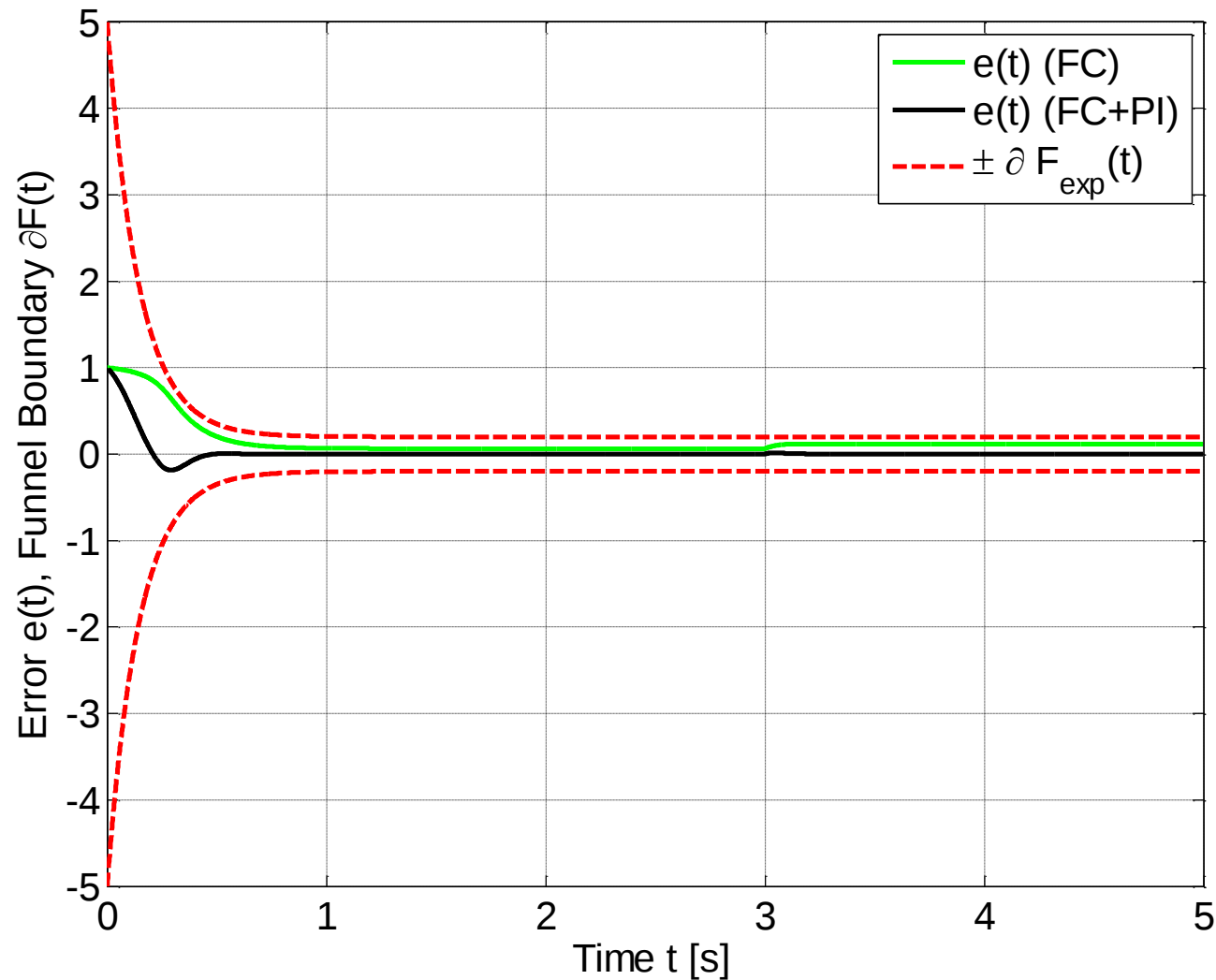
$$\partial \mathcal{F}_{\exp}(t) = 4.8 \cdot \exp\left(-\frac{t}{0.144}\right) + 0.2$$

$$\Psi(t) = 1$$

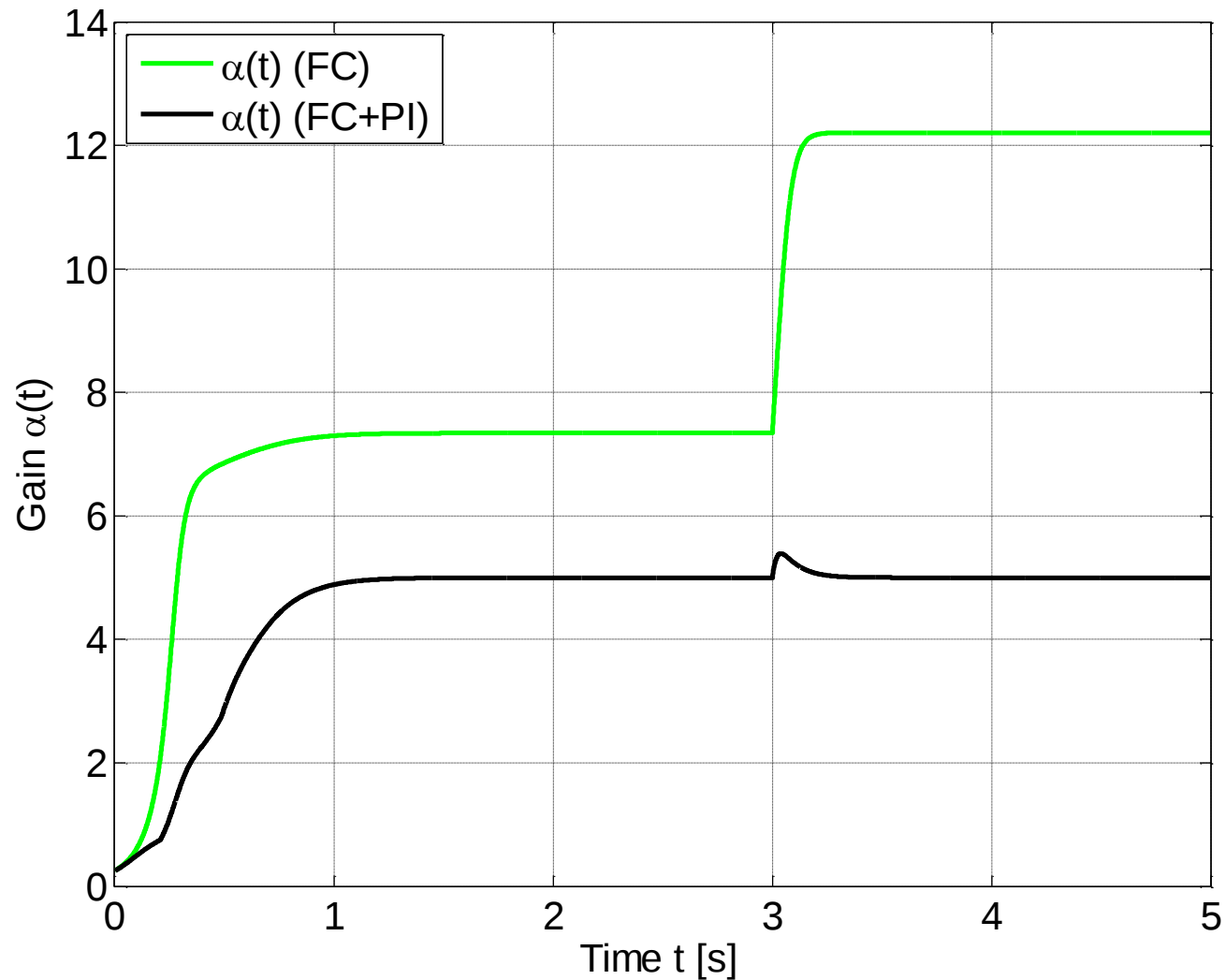
2.a Simulationsergebnisse PT1+PI: Ausgang $y(t)$



2.a Simulationsergebnisse PT1+PI: Fehler $e(t)$ & Trichterrand $\partial F(t)$



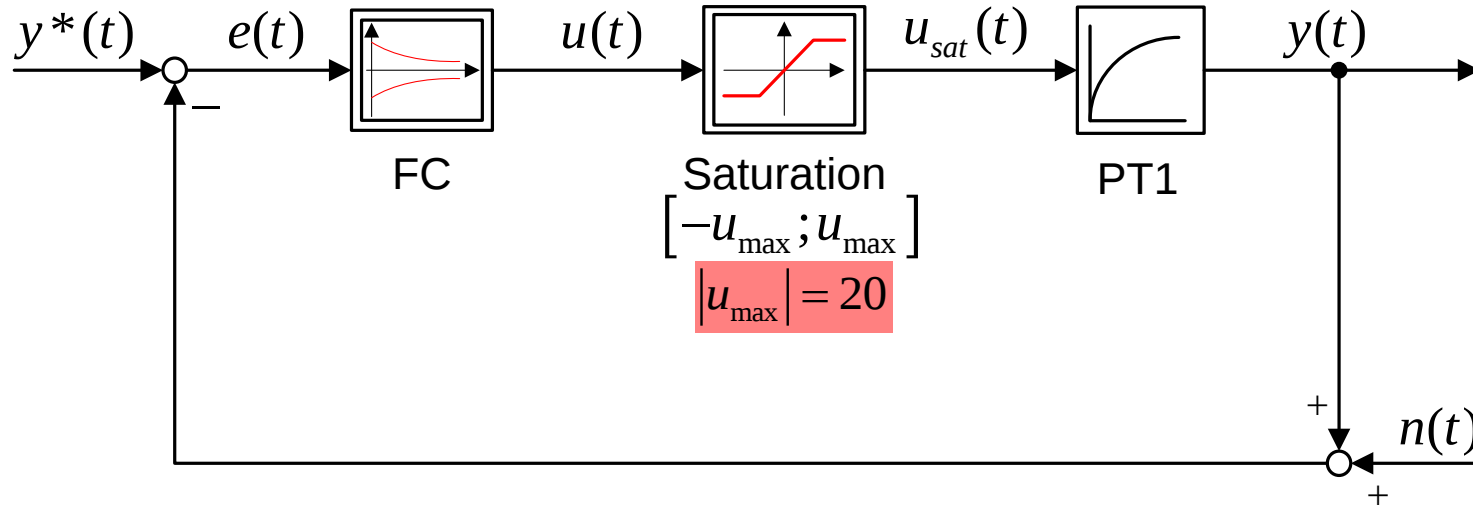
2.a Simulationsergebnisse PT1+PI: Verstärkung $\alpha(t)$



2. Erweiterungen für Funnel-Control

- a) Stationäre Genauigkeit (PI)
- b) **Kompensation bei Stellgrößenbeschränkungen (SIC)**
- c) Aktive Bedämpfung (PSI)

2.b Motivation: Vergleich mit/ohne Stellgrößenbeschränkung



Regelkreis aus PT1 und FC mit Stellgliedbeschränkung

Beispielsystem:

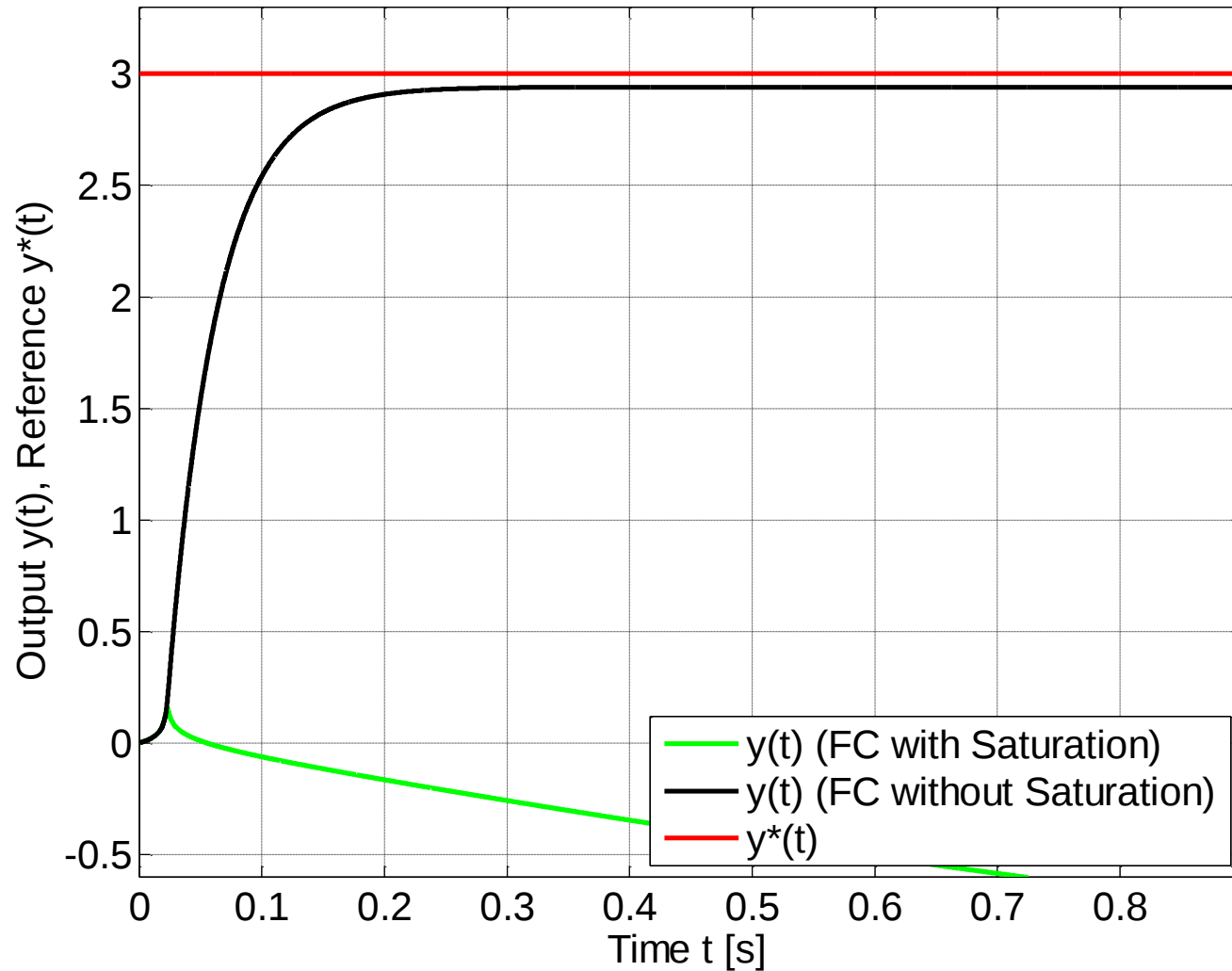
$$F_{PT_1}(s) = \frac{2}{1+s2}$$

Trichterrand und Skalierungsfunktion:

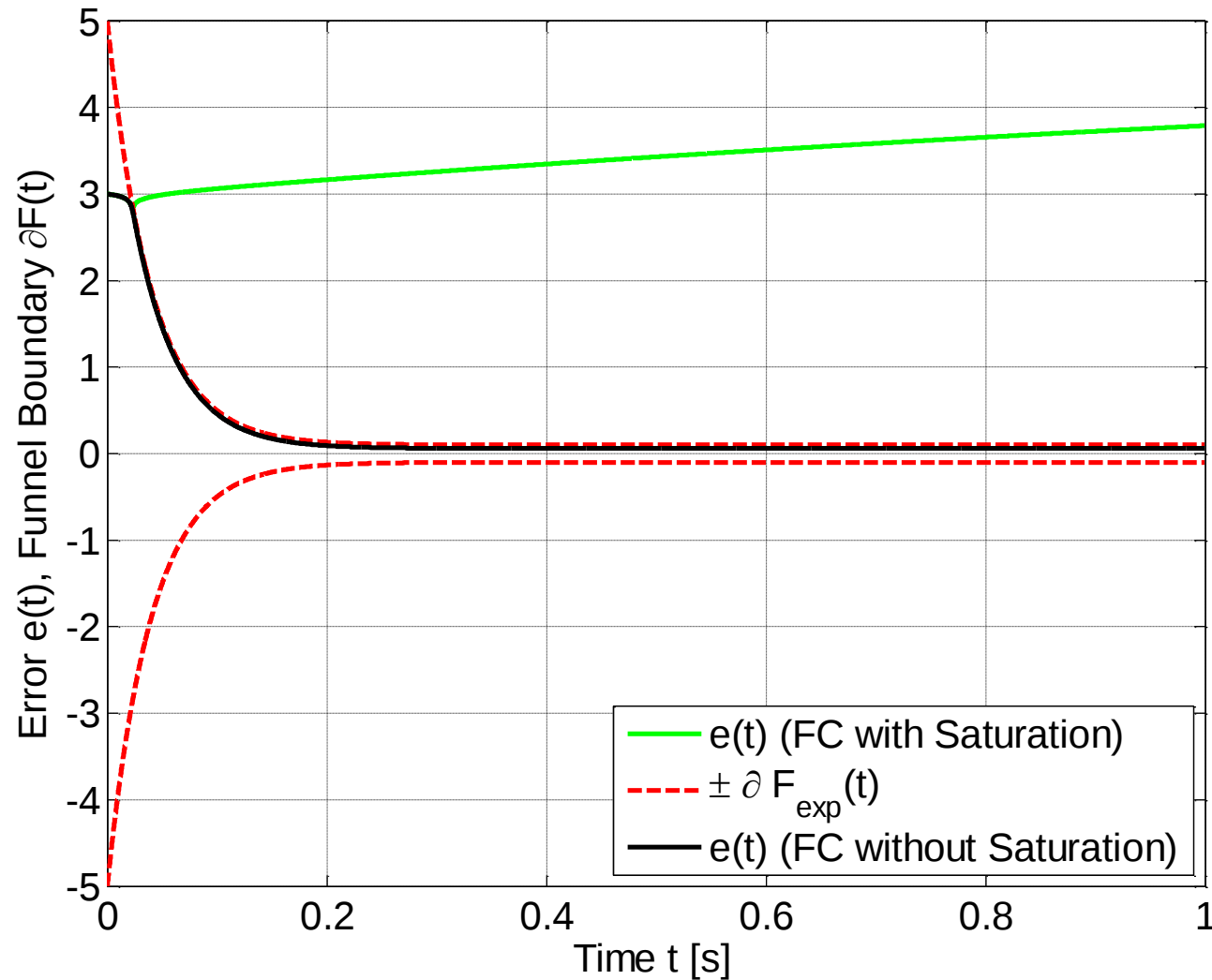
$$\partial \mathcal{F}_{\text{exp}}(t) = 4.9 \cdot \exp\left(-\frac{t}{0.04}\right) + 0.1$$

$$\Psi(t) = 1$$

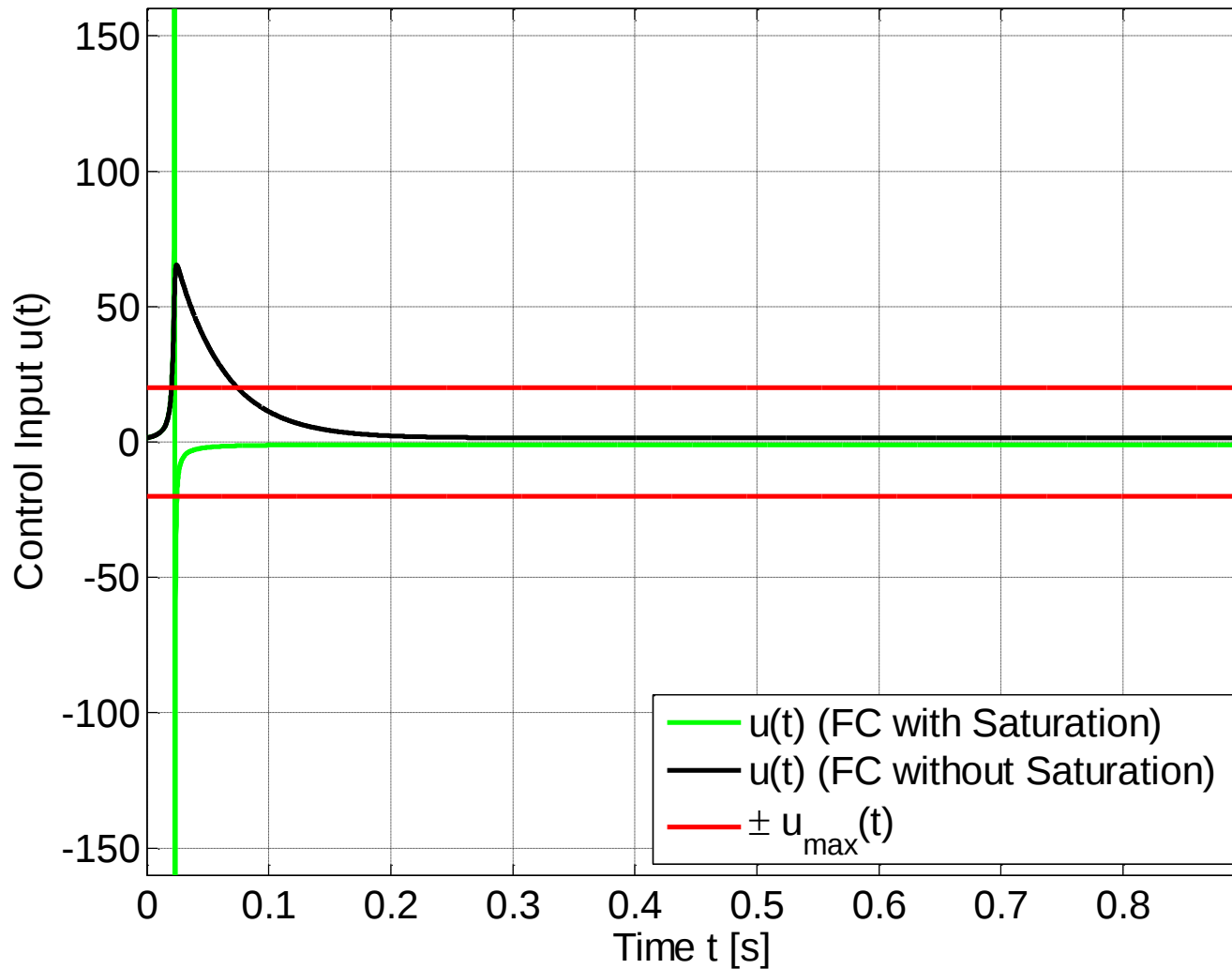
2.b Simulationsergebnisse PT1: Ausgang $y(t)$



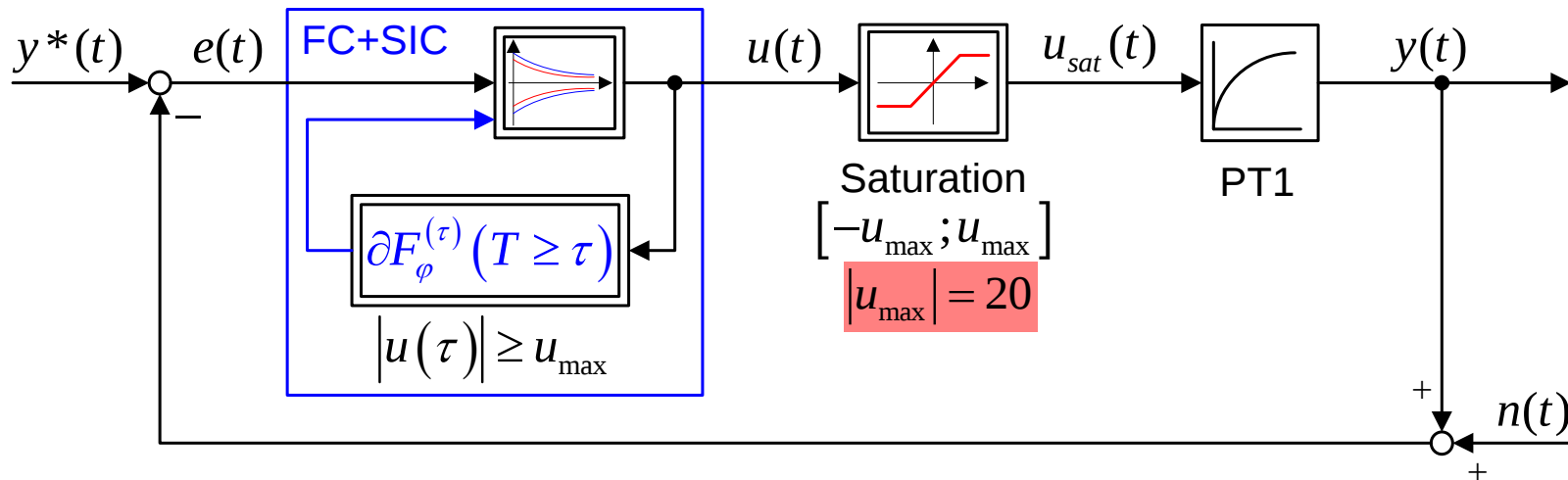
2.b Simulationsergebnisse PT1: Fehler $e(t)$ & Trichterrand $\partial F(t)$



2.b Simulationsergebnisse PT1: Stellgröße $u(t)$



2.b Beispielsystem PT1+SIC:



Regelkreis aus PT1 und FC+SIC mit Stellgliedbeschränkung

Beispielsystem:

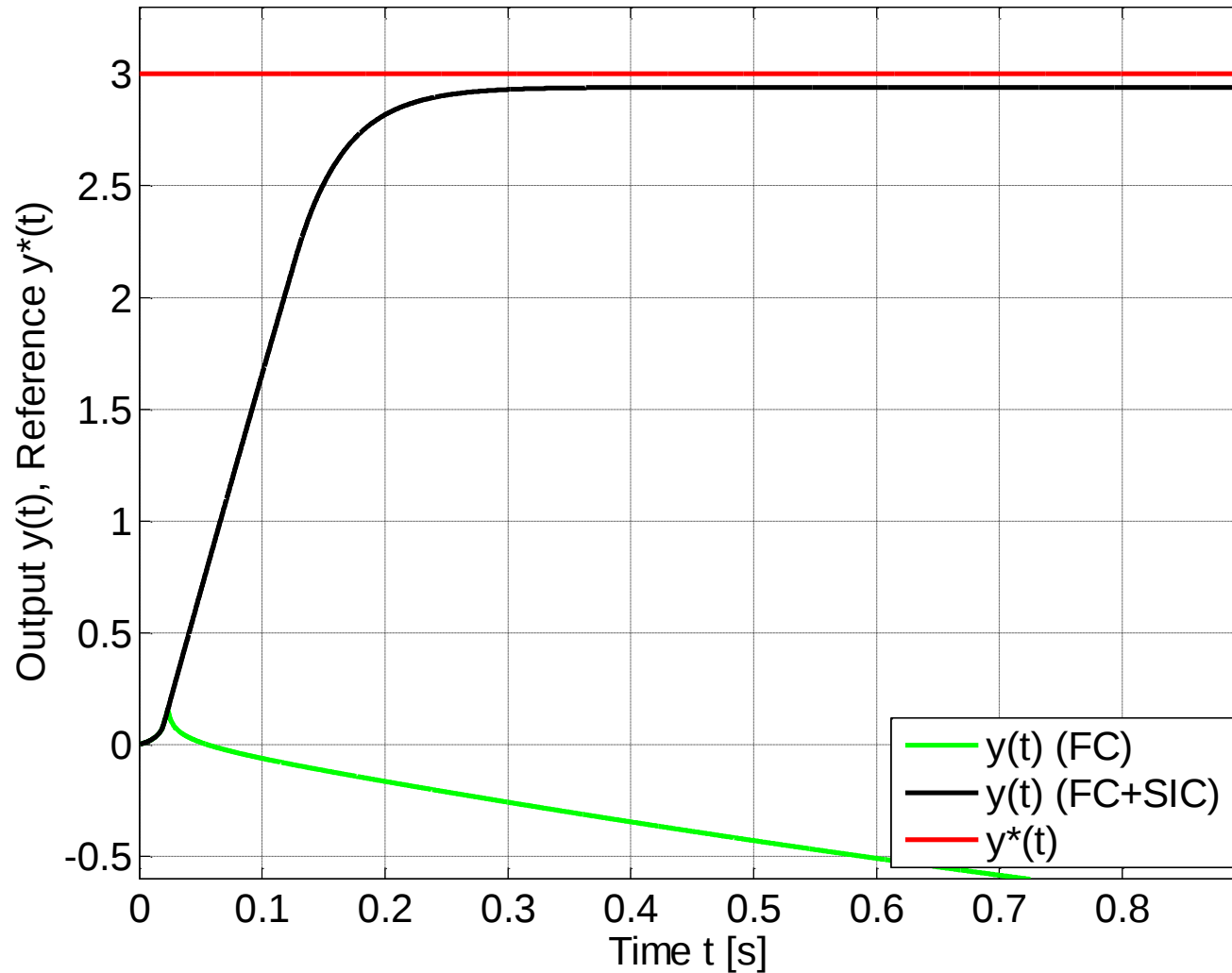
$$F_{PT_1}(s) = \frac{2}{1+s2}$$

Trichterrand und Skalierungsfunktion:

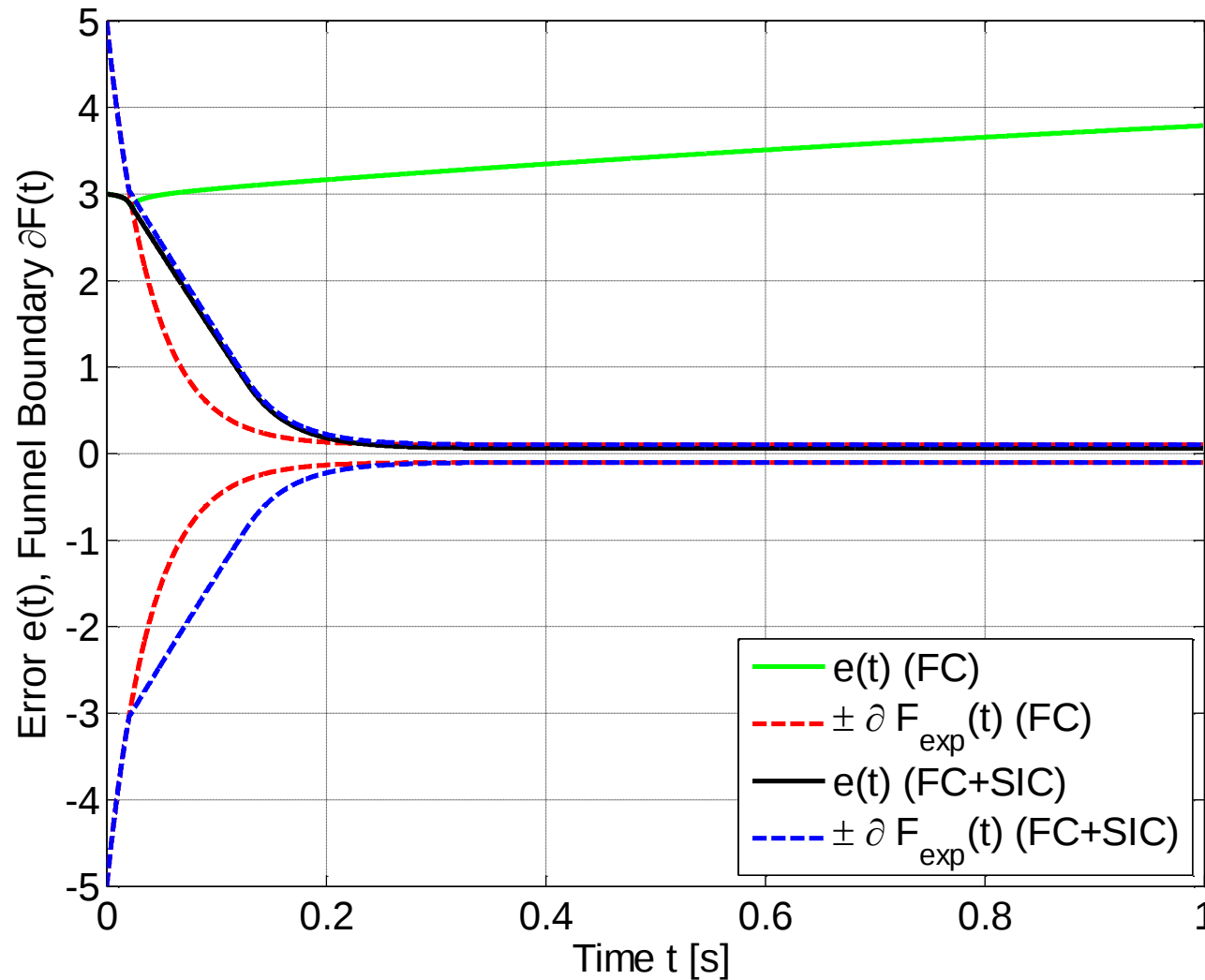
$$\partial \mathcal{F}_{\text{exp}}(t) = 4.9 \cdot \exp\left(-\frac{t}{0.04}\right) + 0.1$$

$$\Psi(t) = 1$$

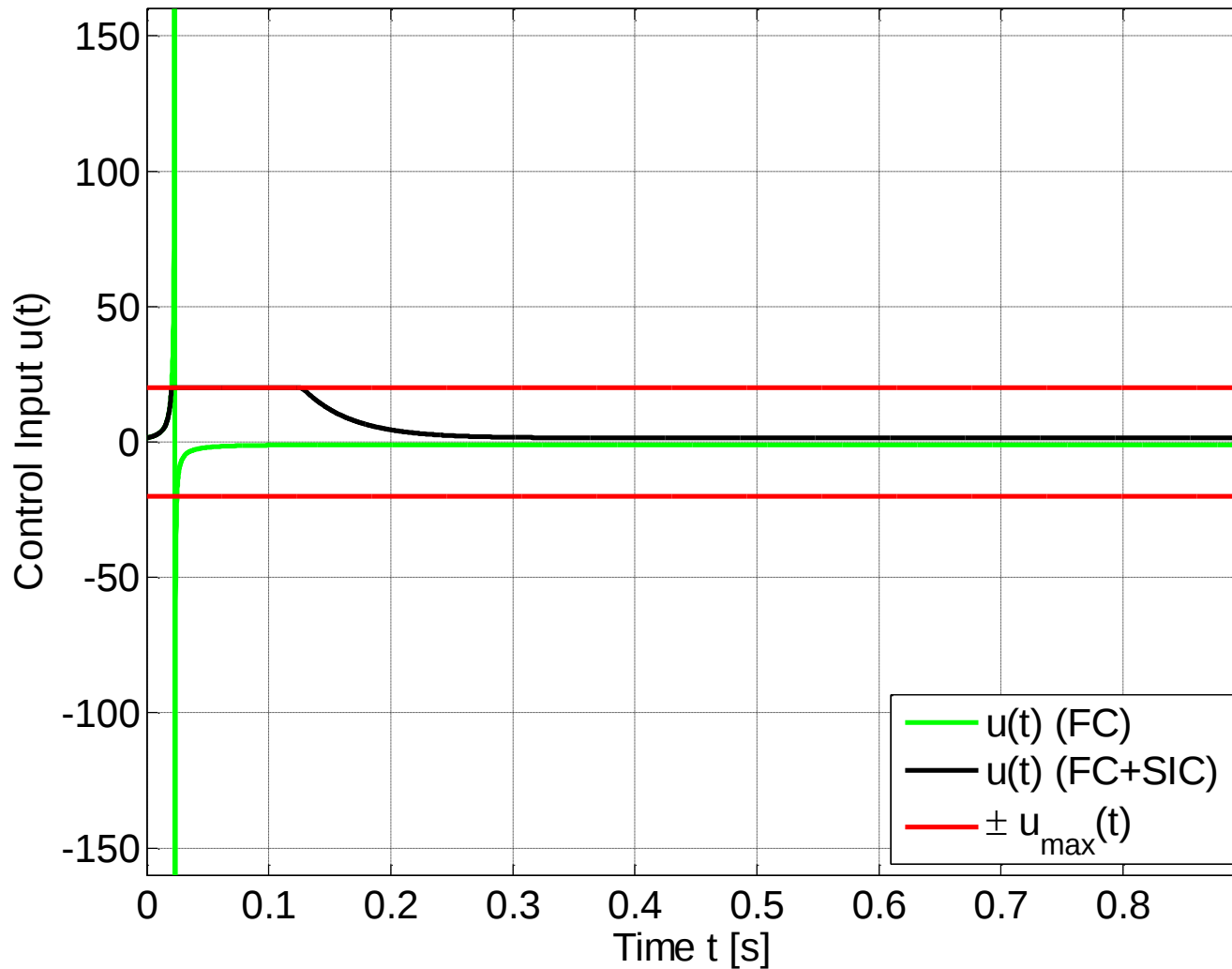
2.b Simulationsergebnisse PT1+SIC: Ausgang $y(t)$



2.b Simulationsergebnisse PT1+SIC: Fehler $e(t)$ & Trichterrand $\partial F(t)$



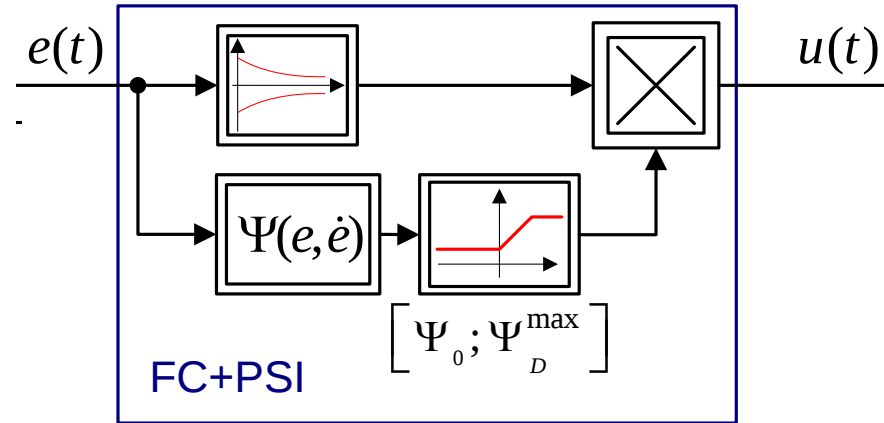
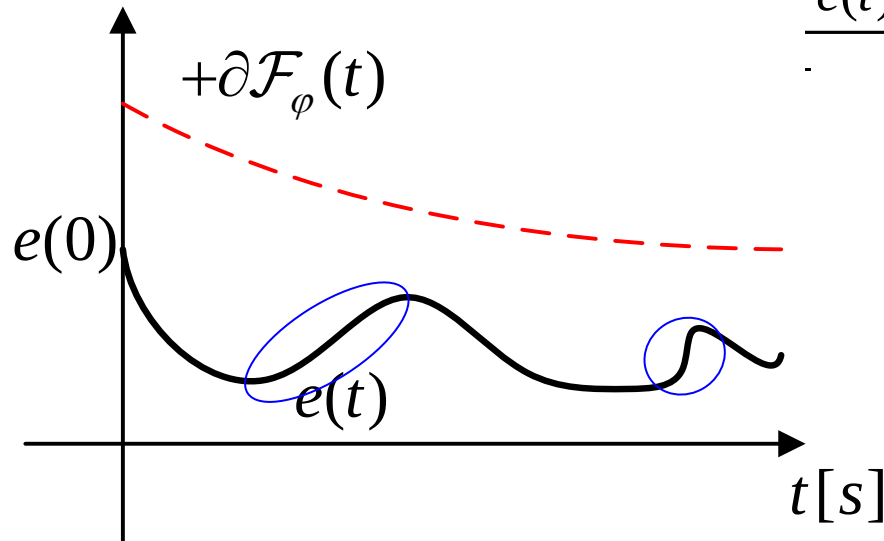
2.b Simulationsergebnisse PT1+SIC: Stellgröße $u(t)$



2. Erweiterungen für Funnel-Control

- a) Stationäre Genauigkeit (PI)
- b) Kompensation bei Stellgrößenbeschränkungen (SIC)
- c) **Aktive Bedämpfung (PSI)**

2.c Aktive Bedämpfung (PSI)



FC Erweiterung mit PSI

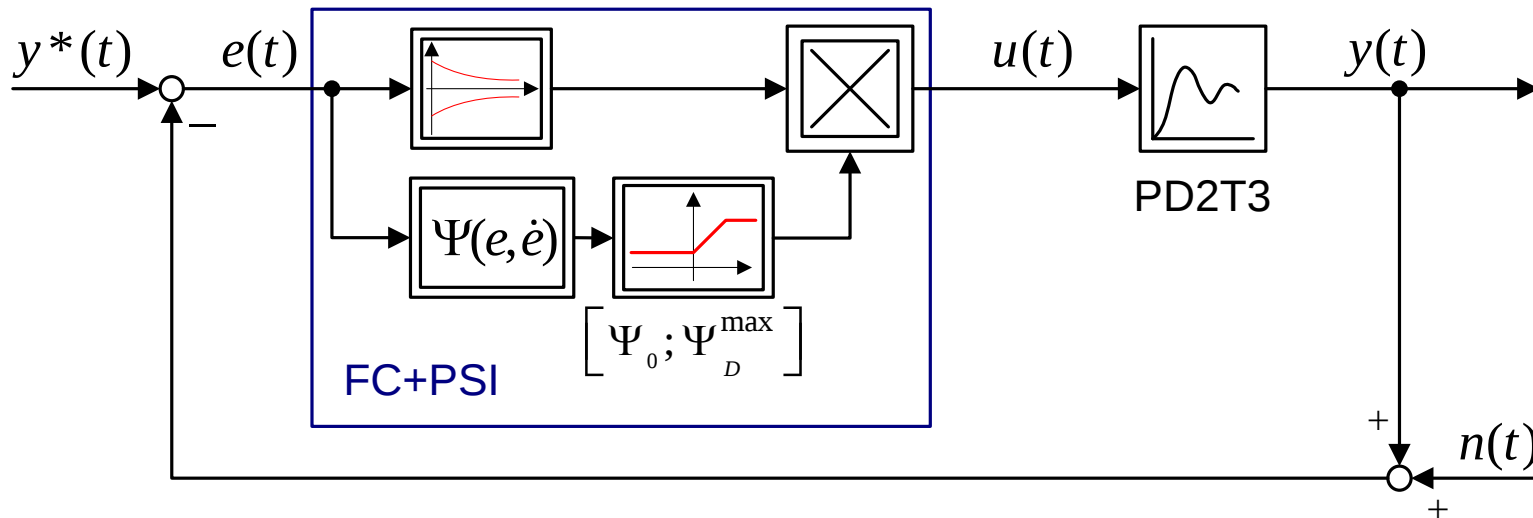
Aktive Bedämpfung durch online Anpassung der Skalierungsfunktion:

$$\Psi(e, \dot{e}) = \text{sat}[\Psi_D \cdot e(t) \cdot \dot{e}(t)]_{\Psi_0}^{\Psi_D^{\max}}$$

mit

$$0 \leq \Psi_D, \Psi_D^{\max} < \infty \text{ und } \Psi_0 \geq 1$$

2.c Beispielsystem PD2T3+PSI:



Regelkreis aus PD2T3 und FC+PSI mit aktiver Bedämpfung

Beispielsystem:

$$F(s) = \frac{3}{1+0.1s} \cdot \frac{1+0.0027s+0.0007s^2}{1+0.0016s^2}$$

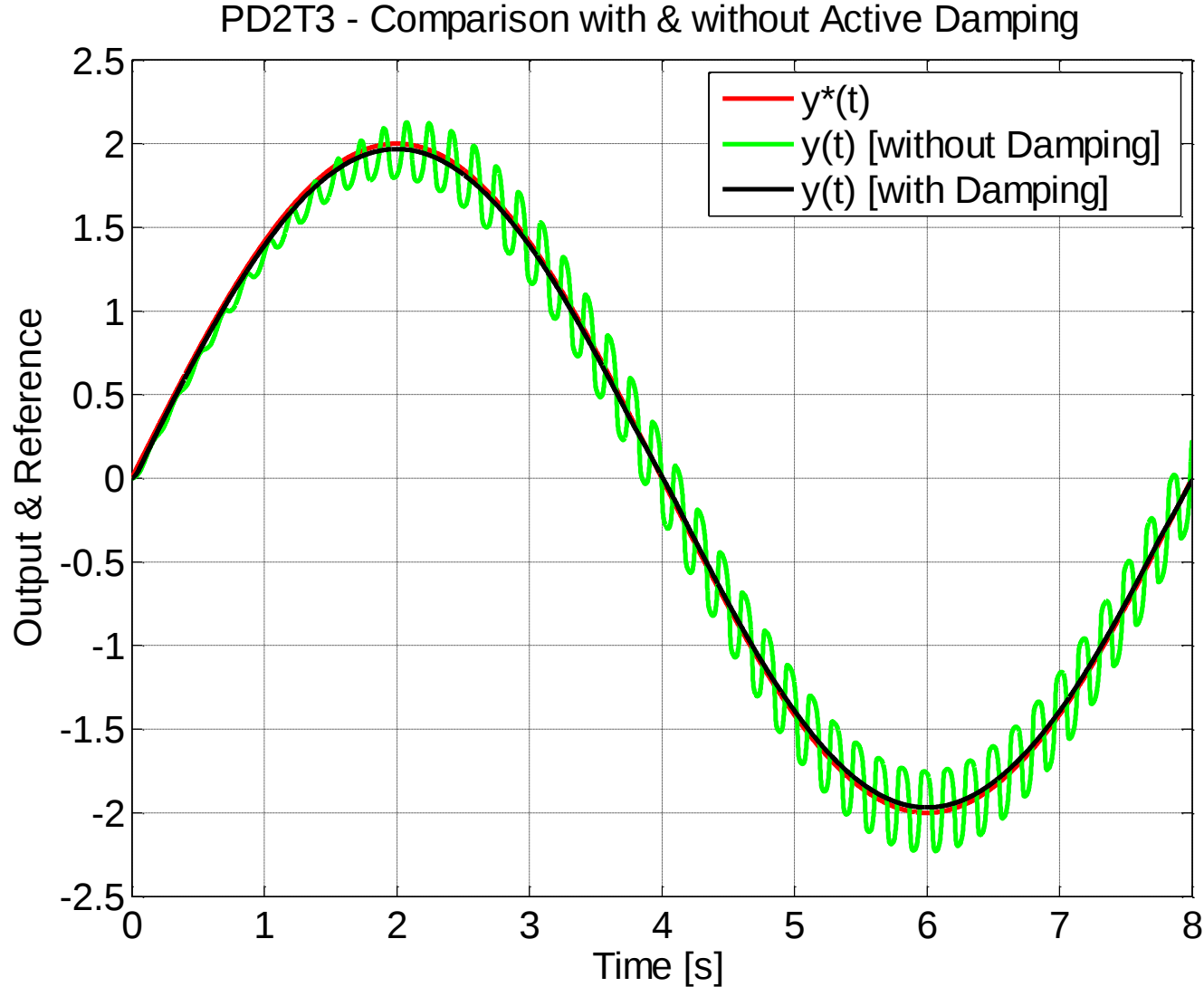
Trichterrand, Skalierung und Saturierung:

$$\partial \mathcal{F}_{\text{exp}}(t) = 1 \cdot \exp\left(-\frac{t}{0.083}\right) + 0.3$$

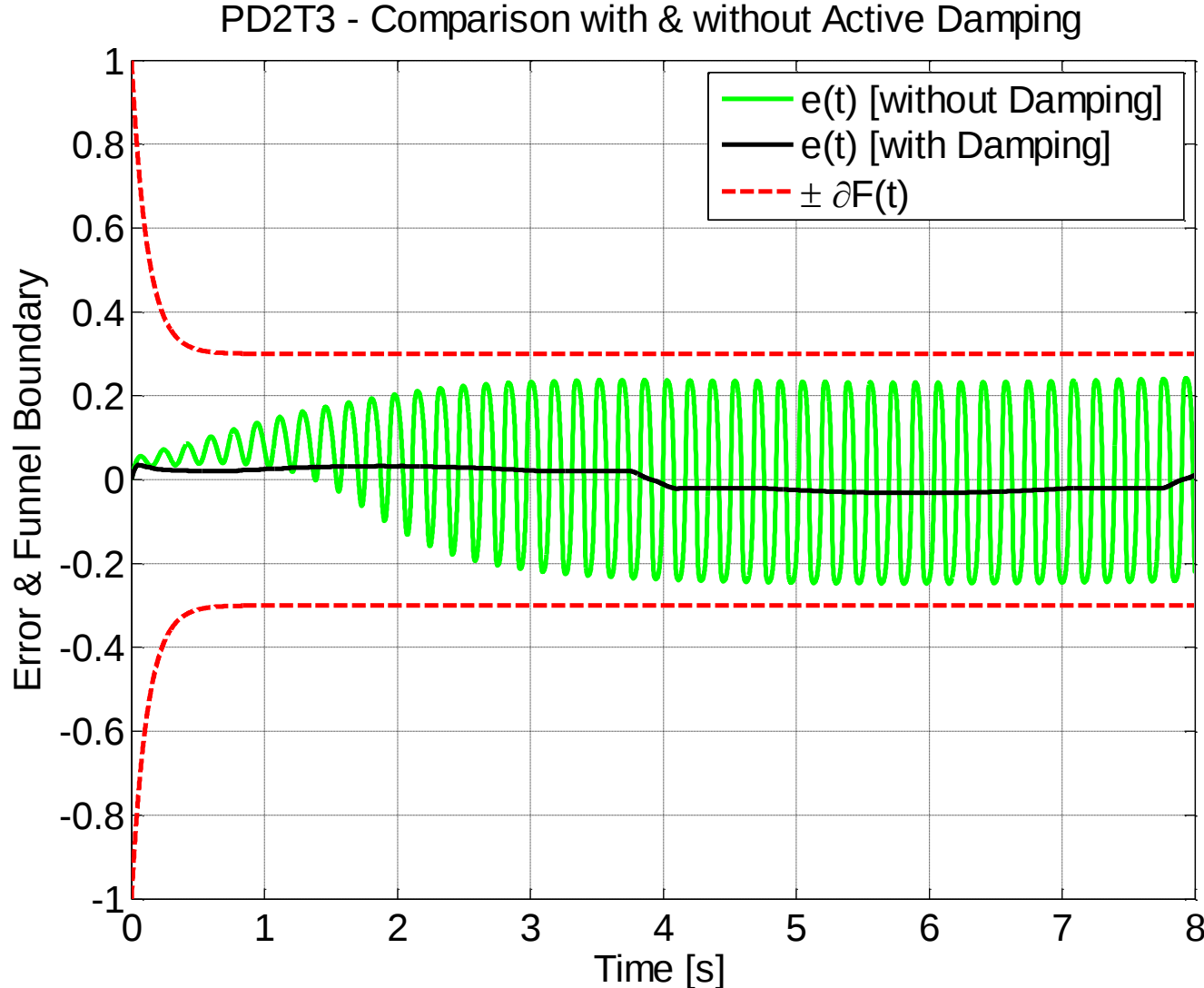
$$\Psi_{oD}(t) = 1$$

$$\Psi_{wD}(t) = \text{sat}\left[100 \cdot e(t) \cdot \dot{e}(t)\right]_1^{10}$$

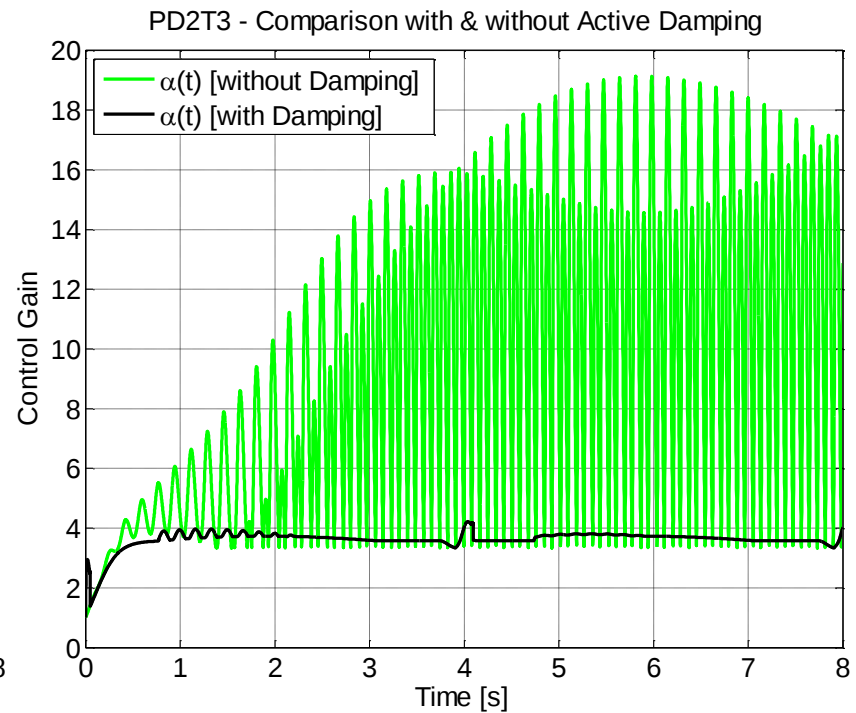
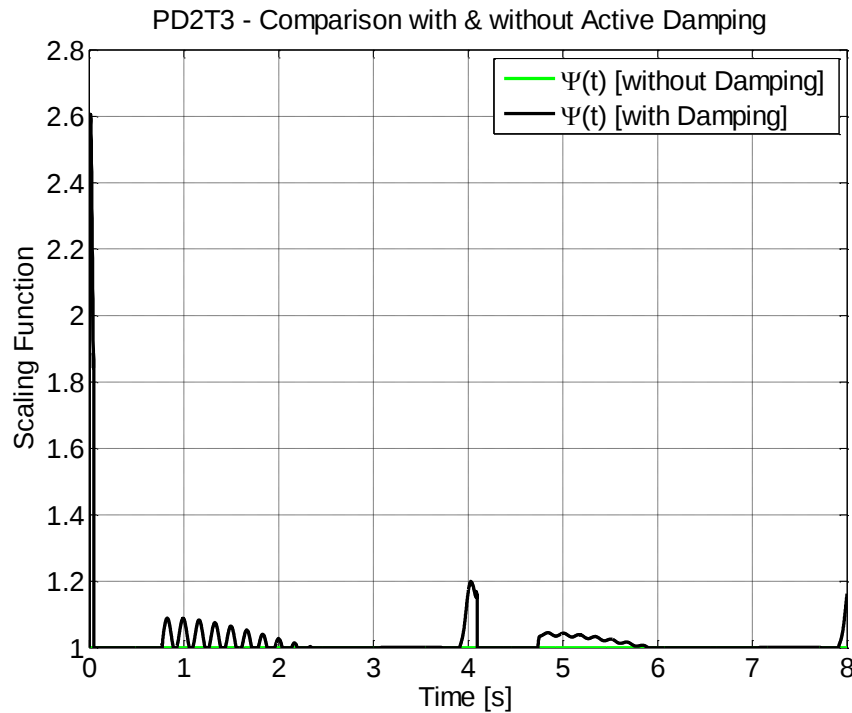
2.c Simulationsergebnisse PD2T3+PSI: Ausgang $y(t)$



2.c Simulationsergebnisse PD2T3+PSI: Fehler $e(t)$ & Trichterrand $pF(t)$



2.c Simulationsergebnisse PD2T3+PSI: Skalierung $\Psi(t)$ & Verstärkung $\alpha(t)$



Funnel-
Control

Erweiterun-
gen für FC

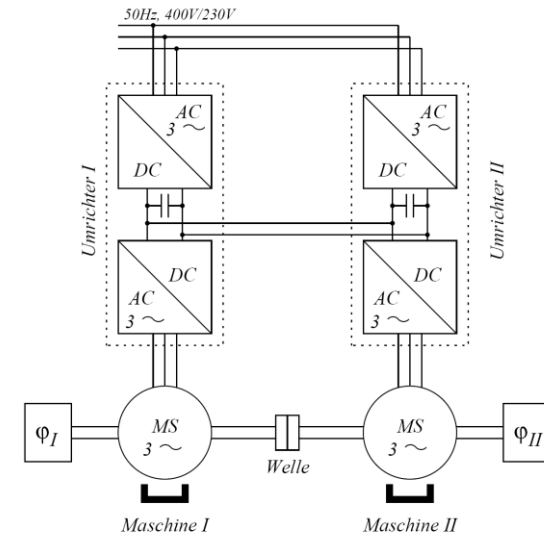
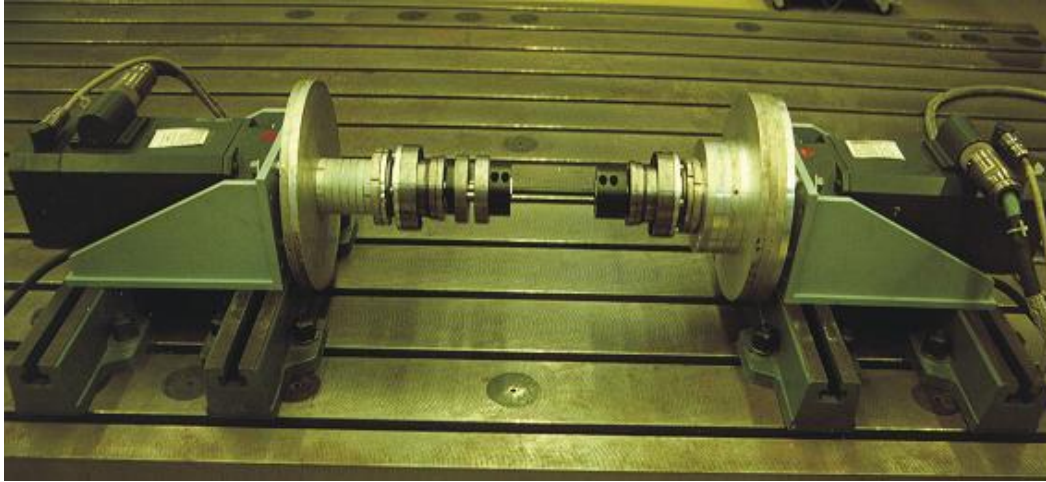
Anwendun-
gen

Ausblick

3. Mögliche Anwendungen

- a) **Zwei-Massen-System**
- b) Manutec R3 Roboter

3.a Zwei-Massen-System (ZMS) - Laboraufbau



Motorseitiges Trägheitsmoment:

$$\Theta_M = 0.166 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

Lastseitiges Trägheitsmoment:

$$\Theta_A = 0.333 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$$

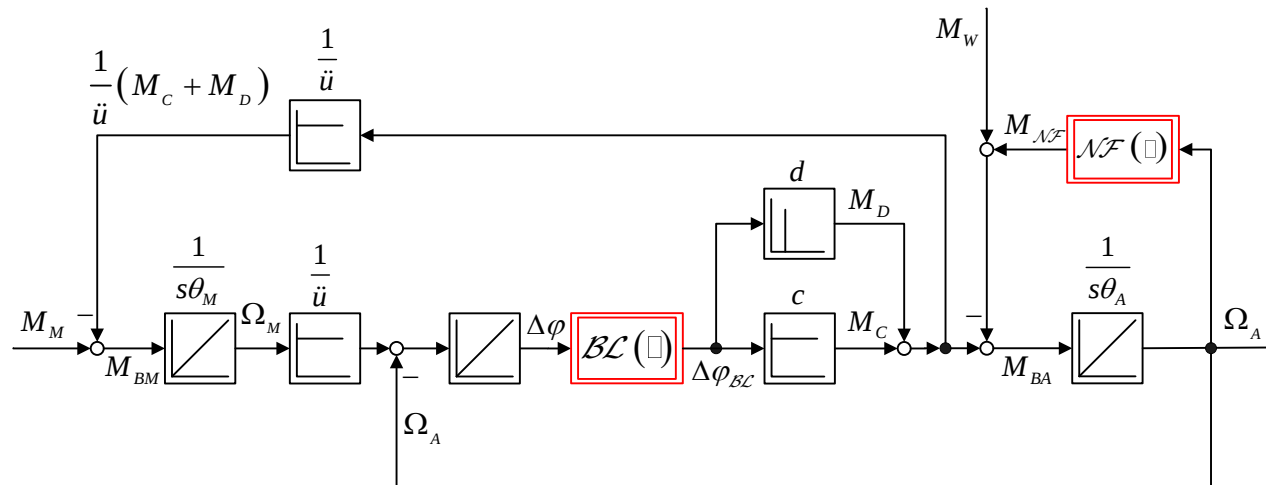
Wellensteifigkeit:

$$c = 410 \frac{\text{Nm}}{\text{rad}}$$

Wellendämpfung:

$$d = 0.025 \frac{\text{Nms}}{\text{rad}}$$

3.a Zwei-Massen-System (ZMS) - Systemmodell



Blockdiagramm - nichtlineares Zwei-Massen-System (Umrichter vernachlässigt)

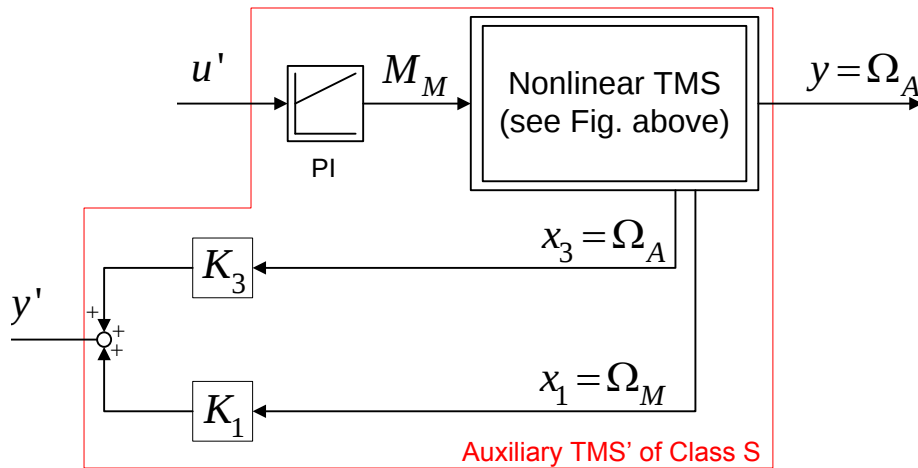
Übertragungsfunktion (linearer Fall):

$$F_{\Omega_A}(s) = \frac{\Omega_A(s)}{M_M(s)} = \frac{1/\ddot{u}}{s(\Theta_M + \Theta_A/\ddot{u}^2)} \cdot \frac{1 + s\frac{d}{c}}{1 + s\frac{d}{c} + s^2 \frac{\Theta_M \Theta_A}{(\Theta_M + \Theta_A/\ddot{u}^2)c}}$$

Relativgrad des ZMS:

$$r_{ZMS} = N - M = 3 - 1 = 2$$

3.a Einführung eines Hilssystems



Blockdiagramm – Hilssystem

Einführung des Hilssystems ($u' \rightarrow y'$):

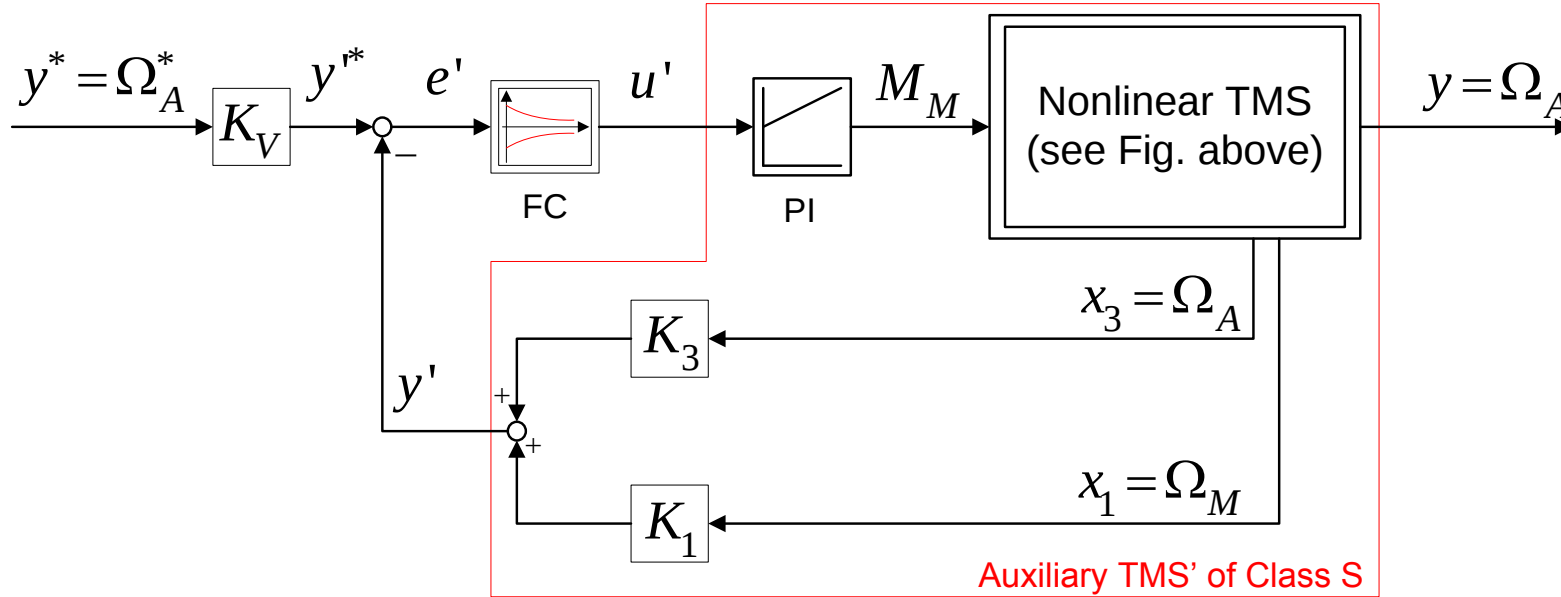
- Reduktion des Relativgrades
- Gewährleistung der Minimalphasigkeit
- Erhalt des positiven HFG

Übertragungsfunktion ohne PI (linearer Fall):

$$F_{y'}(s) = \frac{1/\ddot{u} \left((k_1 + k_3) + s \frac{d}{c} (k_1 + k_3) + s^2 \frac{\Theta_A}{c} k_1 \right)}{s \left(\Theta_M + \Theta_A / \ddot{u}^2 \right) \left(1 + s \frac{d}{c} + s^2 \frac{\Theta_M \Theta_A}{\left(\Theta_M + \Theta_A / \ddot{u}^2 \right) c} \right)}$$

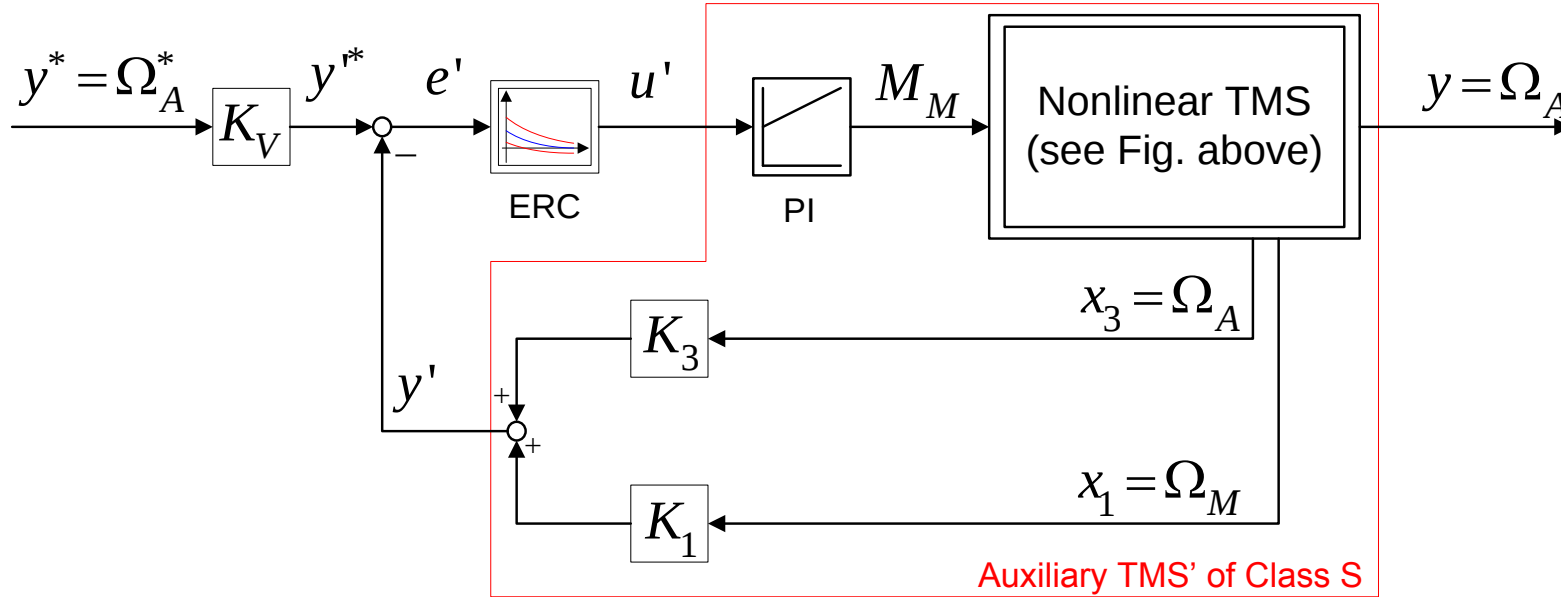
$$\begin{aligned} K_1 &> 0 \\ K_3 &> -K_1 \end{aligned}$$

3.a Funnel-Control Regelkreis (Methode I [FC])



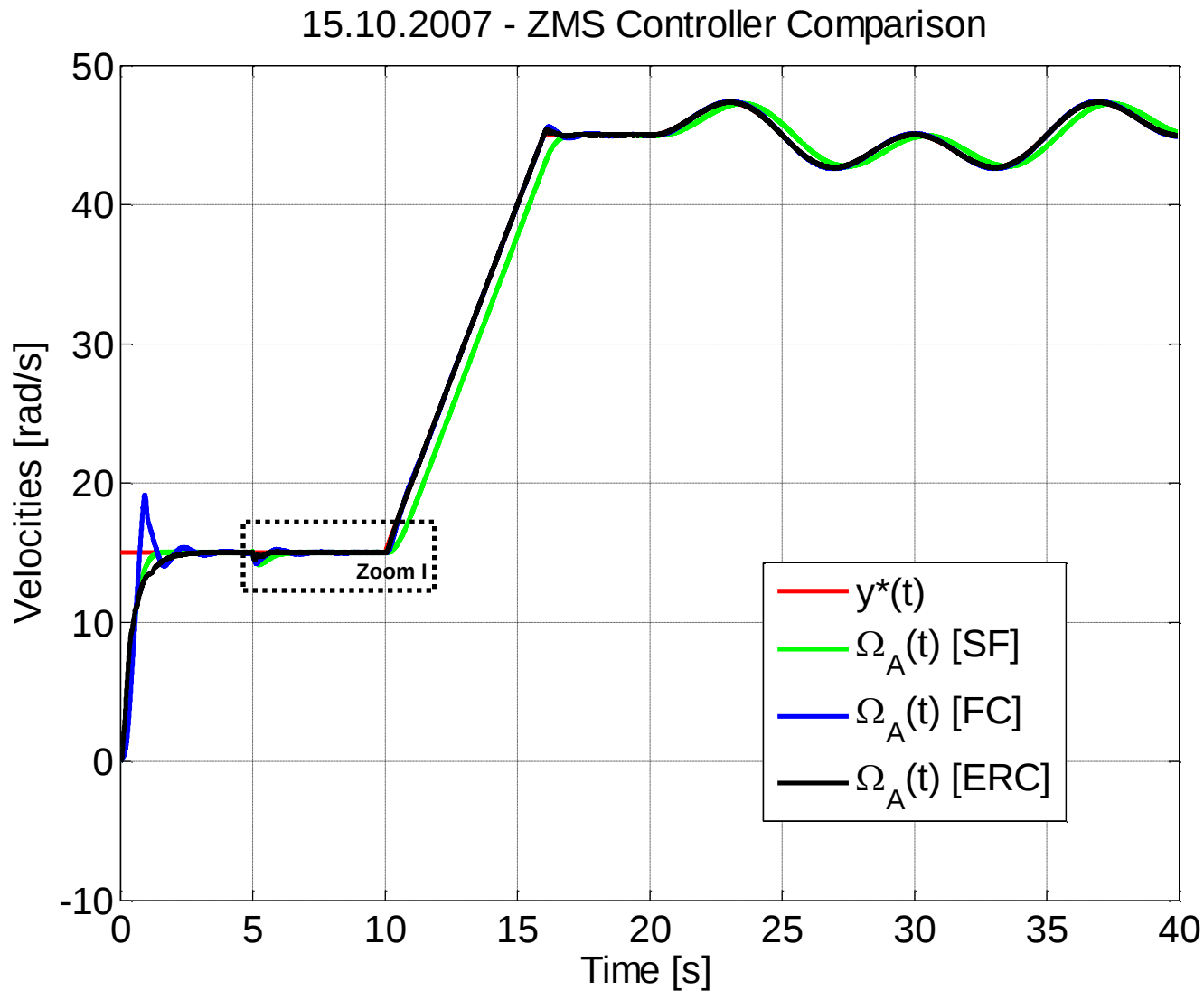
Blockdiagramm – Funnel-Control+PI [FC] Regelkreis mit konstantem Vorfilter

3.a Funnel-Control Regelkreis (Methode II [ERC])

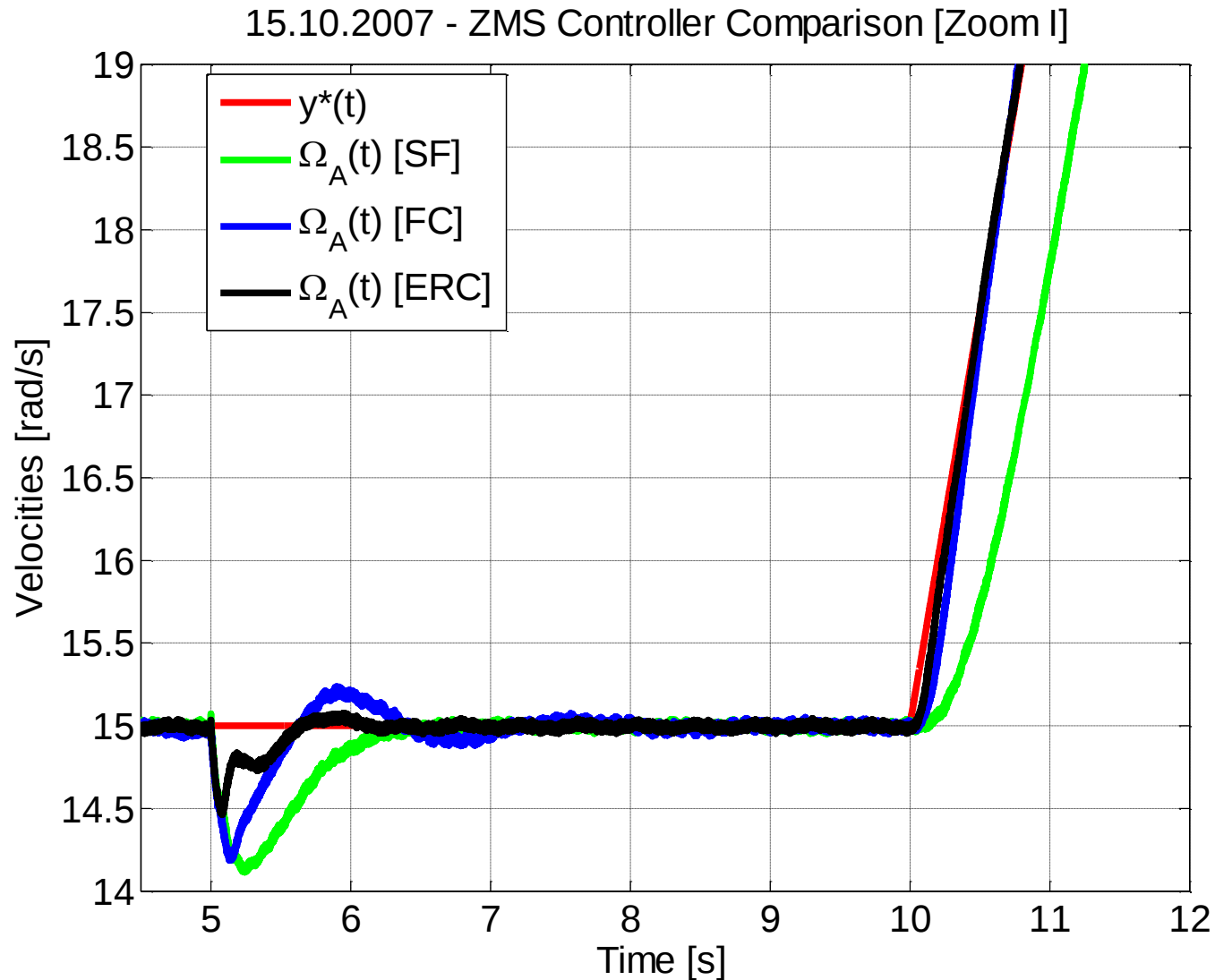


Blockdiagramm – Funnel-Control+PI [ERC] Regelkreis mit konstantem Vorfilter

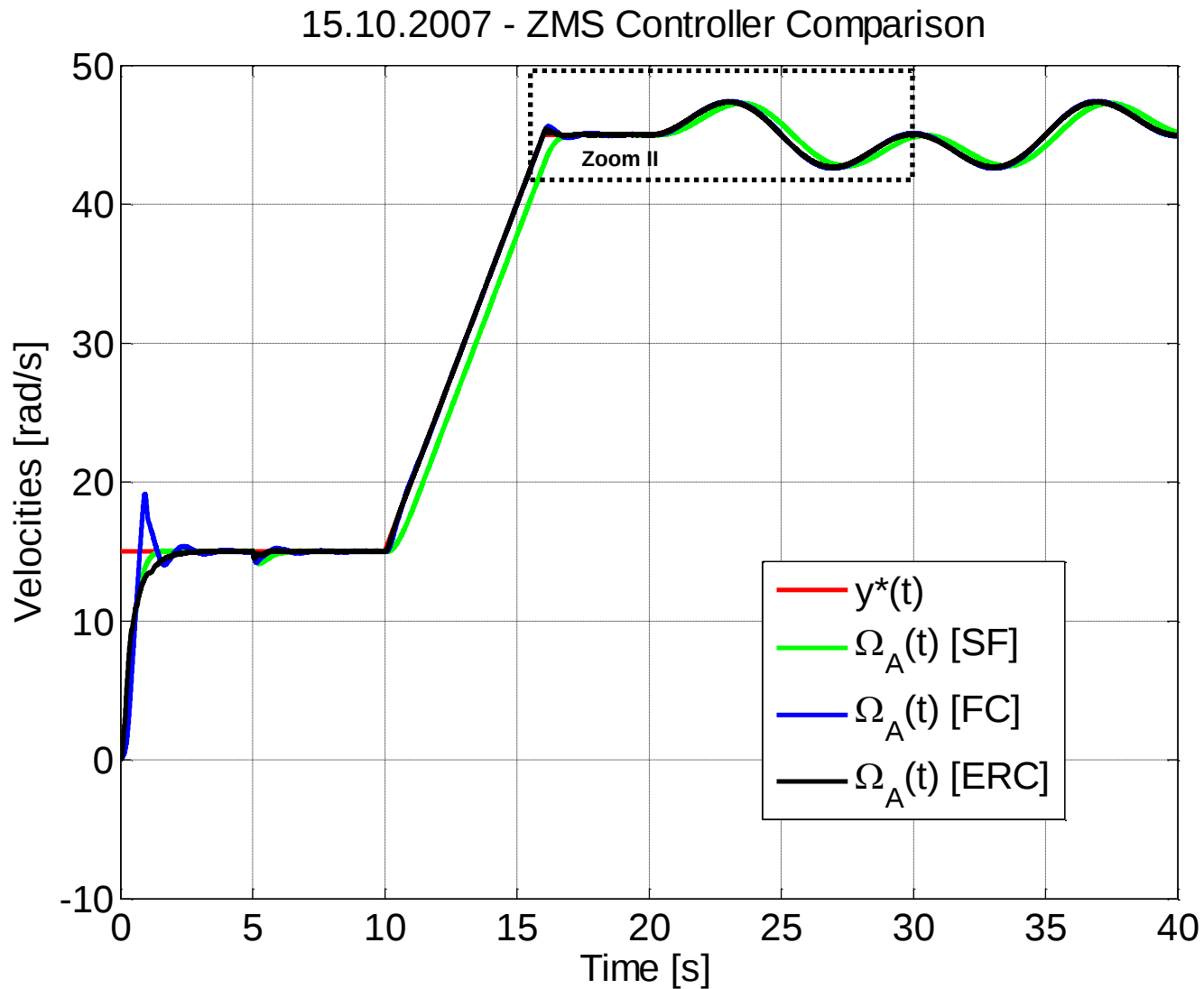
3.a Messergebnisse – Folgewertregelung mit Lastmoment



3.a Messergebnisse – Folgewertregelung mit Lastmoment [Zoom I]



3.a Messergebnisse – Folgewertregelung mit Lastmoment



3.a Messergebnisse – Folgewertregelung mit Lastmoment [Zoom II]

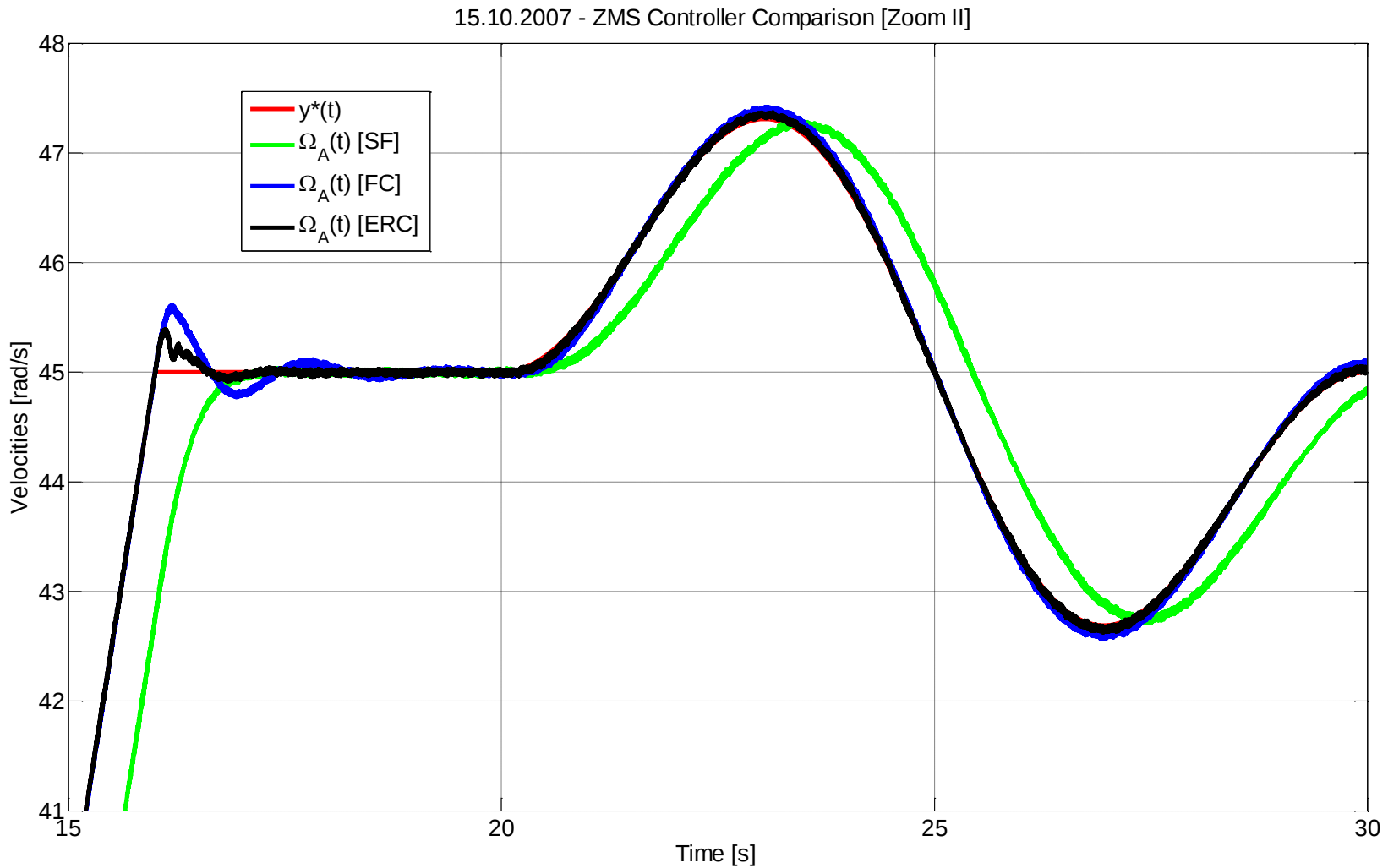
14/06/2012

Funnel-
Control

Erweiterun-
gen für FC

Anwendun-
gen

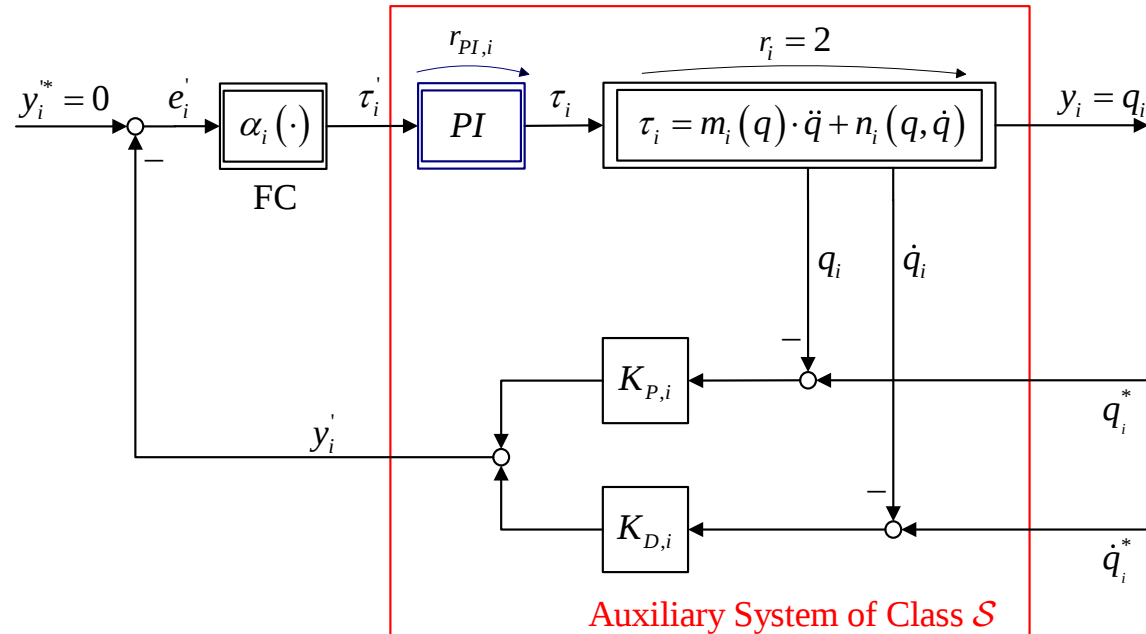
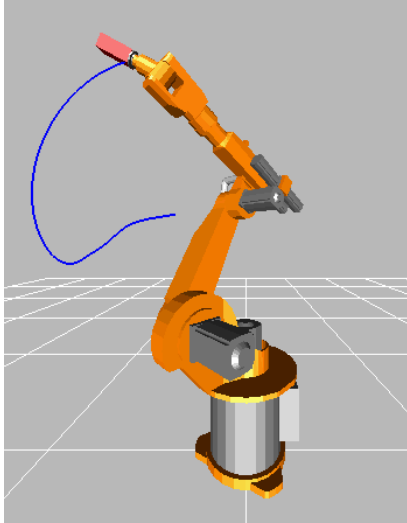
Ausblick



3. Mögliche Anwendungen

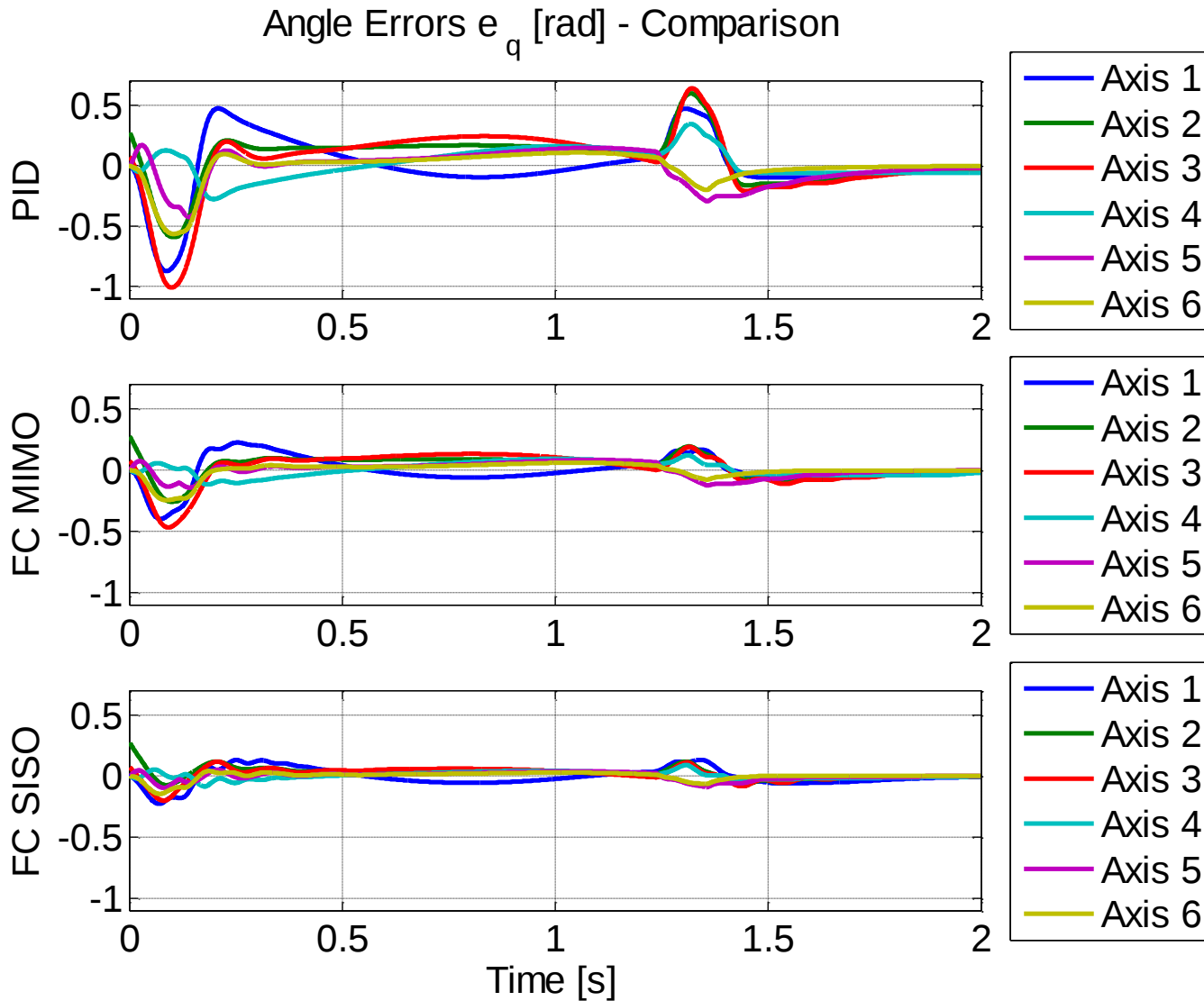
- a) Zwei-Massen-System
- b) **Manutec R3 Roboter**

3.b Manutec R3 Roboter (Allgemeine Beschreibung)



Blockdiagramm – Funnel-Control+PI [FC] Regelkreis für ein Gelenk

3.b Simulationsergebnisse – Positionsfehler (Dymola,Matlab)



4. Zusammenfassung und Ausblick

4. Zusammenfassung:

- Transientes Verhalten kann im Voraus definiert werden (direkt für Systeme der Klasse S)
- Keine Identifikation und/oder Beobachtung des Systems (geringe Anforderungen an Rechenzeit)
- Messrauschen wird toleriert
- Robust gegenüber Parameterunsicherheiten
- Nichtlinearitäten werden beherrscht (z.B. Lose, Hysterese)
- Stationäre Genauigkeit erreichbar mit PI-Erweiterung (PI)
- Stellgrößenbeschränkungen kann entgegengewirkt werden (SIC)
- Aktive Bedämpfung über Skalierungsfunktion möglich (PSI)

4. Ausblick:

- ZMS: Positionsregelung
- Roboter: Minimierung der Einflüsse von Flexibilitäten, Stick-Slip und Verkopplungen der einzelnen Gelenke
- Abschließende Messreihen

Literatur:

1. C.M. Hackl, "Stabilitätsuntersuchungen adaptiver Regelungskonzepte für mechatronische Systeme", Diplomarbeit, Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme, Technische Universität München, Germany, August 2004
2. H.Schuster, C.M. Hackl, C. Westermaier and D. Schröder, "Funnel-Control for Electrical Drives with Uncertain Parameters", Proceedings of the 7th International Power Engineering Conference, IPEC 2005 - Singapore, Nov. 29 - Dec. 2, 2005.
3. C.M. Hackl, H.Schuster, C. Westermaier and D. Schröder, "Funnel-Control with Integrating Prefilter for Nonlinear, Time-varying Two-Mass Flexible Servo Systems", Proceedings of the 9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, pp. 456 - 461, AMC 2006 - Istanbul, Turkey, March 27-29, 2006
4. C.M. Hackl, D. Schröder, "Extension of High-Gain Controllable Systems for Improved Accuracy", Proceedings of the IEEE International Conference on Control Applications (Joint Conference on CCA, CACSD, and ISIC), pp. 2231-2236, CCA 2006 - Munich, Germany, October 4-6, 2006
5. C.M. Hackl, D. Schröder, "Funnel-Control for Nonlinear Multi-Mass Flexible Systems", Proceedings of the 32nd IEEE Annual Conference on Industrial Electronics, pp. 4707 - 4712, IECON 2006 - Paris, France, November 7 - 10, 2006
6. C.M. Hackl, D. Schröder, "Funnel-Control with Online Foresight", Proceedings the 26th IASTED International Conference on Modelling, Identification and Control, pp. 171-176, MIC 2007 - Innsbruck, Austria, February 12 - 14, 2007
7. C.M. Hackl, Y. Ji and D. Schröder, "Funnel-Control with Constrained Control Input Compensation", Proceedings of the 9th IASTED International Conference CONTROL AND APPLICATIONS (Paper 568-087), ISBN Hardcopy: 978-0-88986-665-2 / CD: 978-0-88986-666-9, CA 2007 - Montreal, Quebec, Canada, May 30 - Jun 01, 2007
8. C.M. Hackl, Y. Ji and D. Schröder, "Enhanced Funnel-Control with Improved Performance", Proceedings of the 15th Mediterranean Conference on Control and Automation (Paper T01-016), MED 2007 - Athens, Greek, Jun 27-29, 2007
9. C.M. Hackl, Y. Ji and D. Schröder, "Nonidentifier-based Adaptive Control with Saturated Control Input Compensation", Proceedings of the 15th Mediterranean Conference on Control and Automation (Paper T01-015), MED 2007 - Athens, Greek, Jun 27-29, 2007