

# „Dezentrale Bahnspannungsregelverfahren am Beispiel einer Papierstreichanlage“

Ergebnisse des AIF Forschungsvorhabens 14140N in  
Zusammenarbeit mit der PTS München (VESTRA)

Dr.-Ing. Christoph Hackl



Überblick &  
Forschungsziel

Anlage,  
Schnittstelle &  
Datensammlung

Modellierung  
und Analyse

Dezentrale  
Regelungs-  
konzepte

Rakelvorsteu-  
erung

Dezentrale  
Beobachter

Zusammen-  
fassung &  
Ausblick

# Gliederung

1. **Überblick & Forschungsziel**
2. **VESTRA Anlage, Schnittstelle und Datensammlung**
3. **Systemmodellierung –und Analyse**
4. **Dezentrale Regelungskonzepte:  
PI-Kaskade, Dezentrale Entkopplung (Simulations- und  
Messergebnisse)**
5. **Rakelvorsteuerung:  
Stiff-, Bentblade (Simulations- und Messergebnisse)**
6. **Dezentrale Beobachter (Simulations- und Messergebnisse)**
7. **Zusammenfassung & Ausblick**

# Überblick und Forschungsziel



Abb. 1: Pilot-Papierstreichanlage VESTRA PTS, München

## Prozess der Papierveredelung (Papierstreichen)

- Papierquelle (Abrollung)
- Farbauftrag (durch verschiedene Aggregate)
- Papiertrocknung (Tiefen- & Oberflächentrocknung)
- Papiersenke (Aufrollung)

## Forschungsziel:

### Optimierung der Bahnzugregelung

- ⇒ Regelgüte
- ⇒ Entkopplung
- ⇒ Störgrößenkompensation (Rakelvorsteuerung)

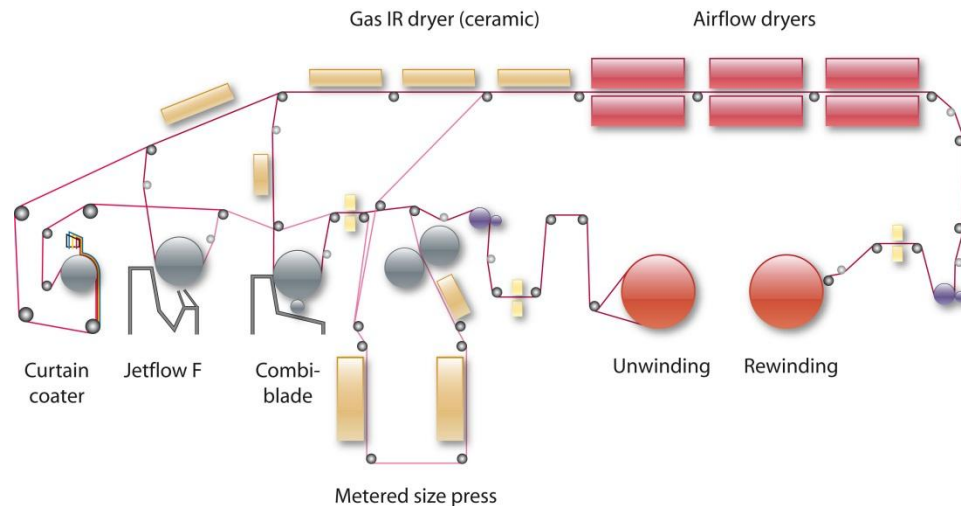


Abb. 2: Übersicht des Streichprozesses (Bahnlauf der VESTRA)

# VESTRA Anlage und Schnittstelle zu dSPACE

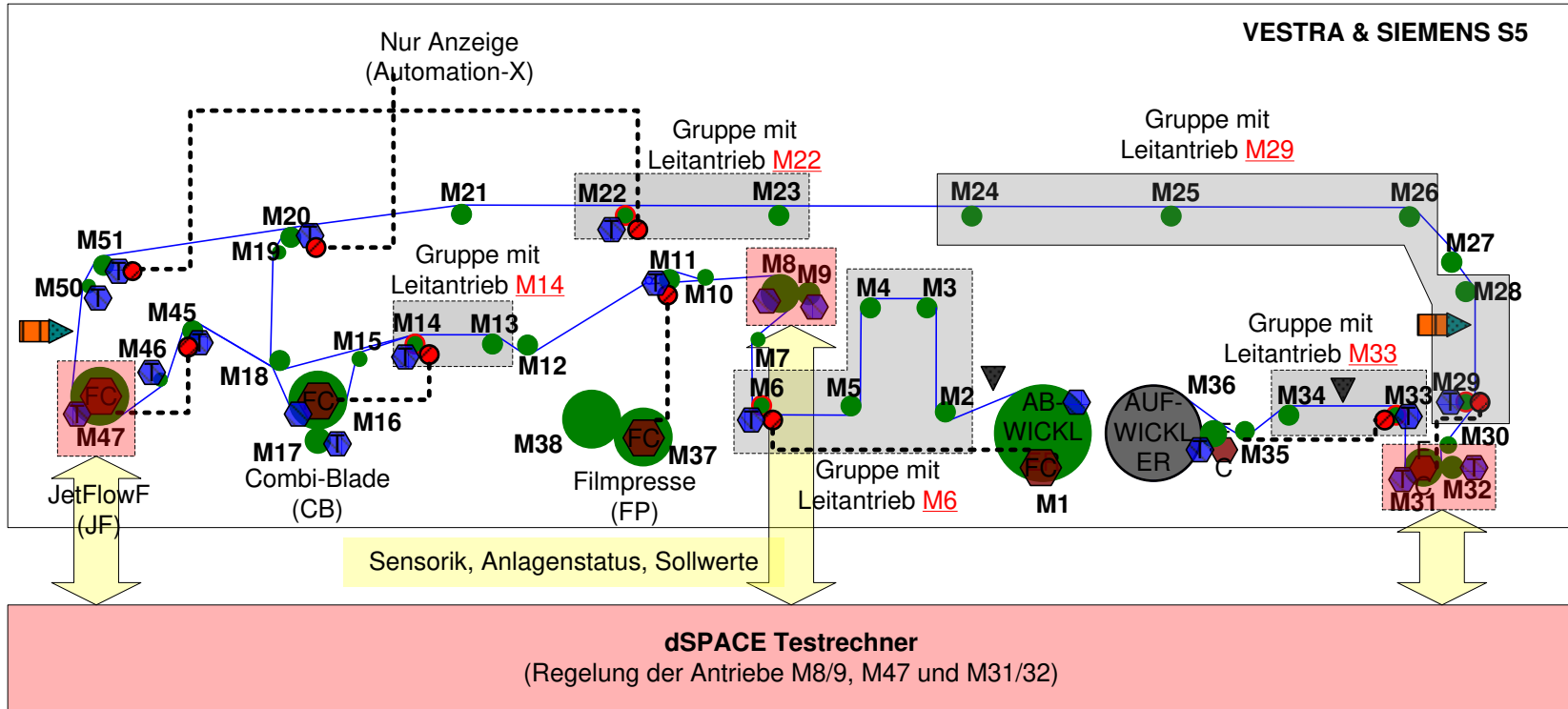


Abb. 3: Schnittstelle zur Regelung der VESTRA mit S5 und dSPACE Testrechner (Betriebsart JetflowF)

Überblick & Forschungsziel

Anlage, Schnittstelle & Datensammlung

Modellierung und Analyse

Dezentrale Regelungskonzepte

Rakelvorsteuerung

Dezentrale Beobachter

Zusammenfassung & Ausblick

Für Simulation und Laboruntersuchungen werden Parameterwerte der realen Anlage benötigt, z.B.:

- Walzenradien und –trägheitsmomente
- Bahnlängen zwischen Klemm- bzw. Umschlingungswalzen
- Umschlingungswinkel
- Motor- und Umrichterdaten
- Getriebe- und Kupplungsdaten
- Daten des installierten Regelungskonzeptes

⇒ **Modellierung und Systemanalyse**

⇒ **Aufbau eines Simulationsmodells der VESTRA**

⇒ **Aufbau, Test und Vergleich der installierten und optimierten Regelungen**  
(ohne dabei den Betrieb der VESTRA einzuschränken)

# Systemmodellierung:

## 1.) Elastisches Zwei-Massen-System

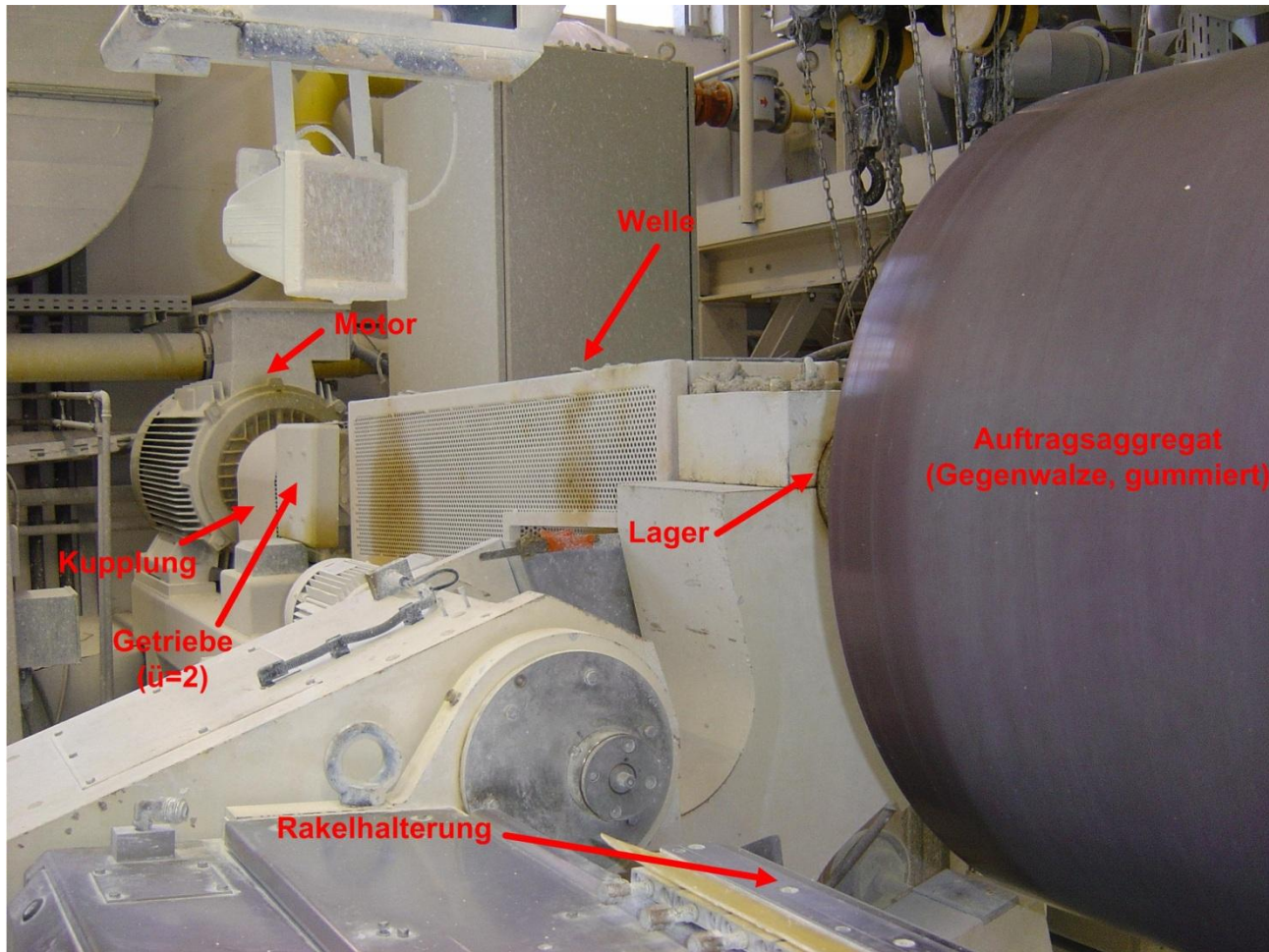


Abb. 4: Antriebssystem M47 (Auftragsaggregat JetflowF) zwischen Motor und Walze (elastische Welle, Lose & Reibung)

Überblick &  
Forschungsziel

Anlage,  
Schnittstelle &  
Datensammlung

Modellierung  
und Analyse

Dezentrale  
Regelungs-  
konzepte

Rakelvorsteu-  
erung

Dezentrale  
Beobachter

Zusammen-  
fassung &  
Ausblick

# Systemmodellierung:

## 1.) Elastisches Zwei-Massen-System

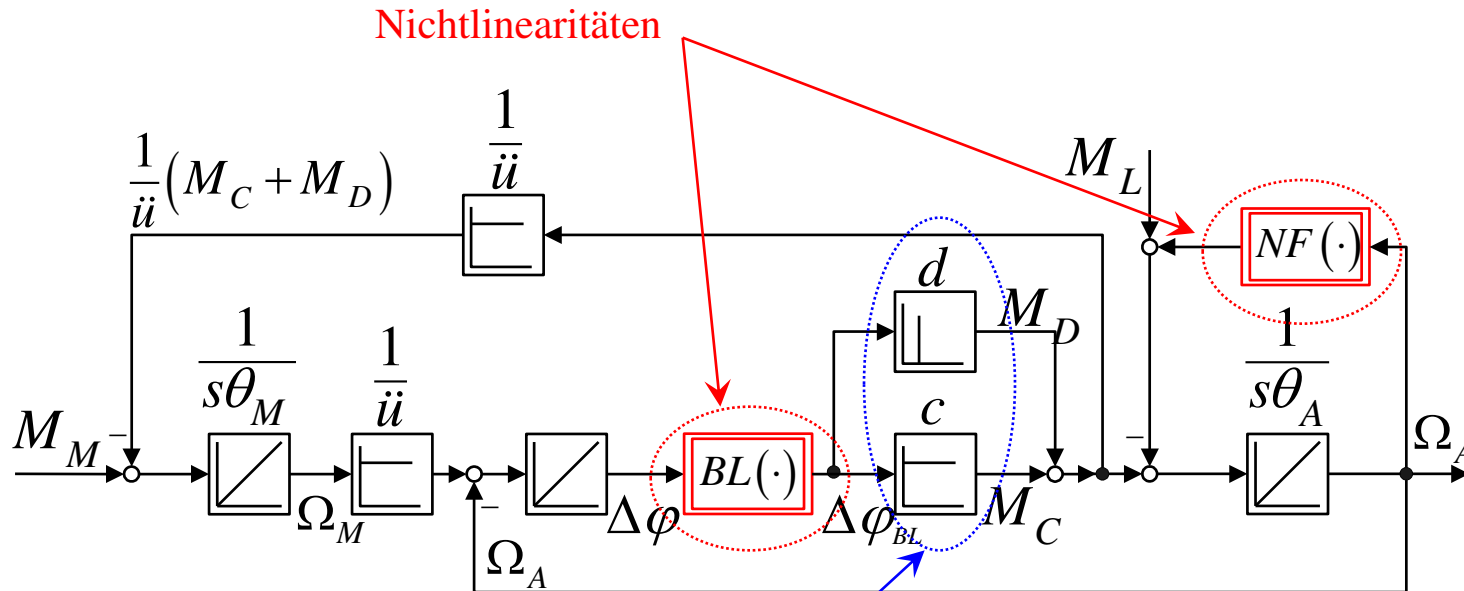


Abb. 5: Elastisches Zwei-Massen-System zwischen Motor und Walze (Welle, Lose BL & Reibung NF)

Parameterunsicherheiten

# Systemmodellierung:

## 2.) Teilsystem #i (Klemmstelle)

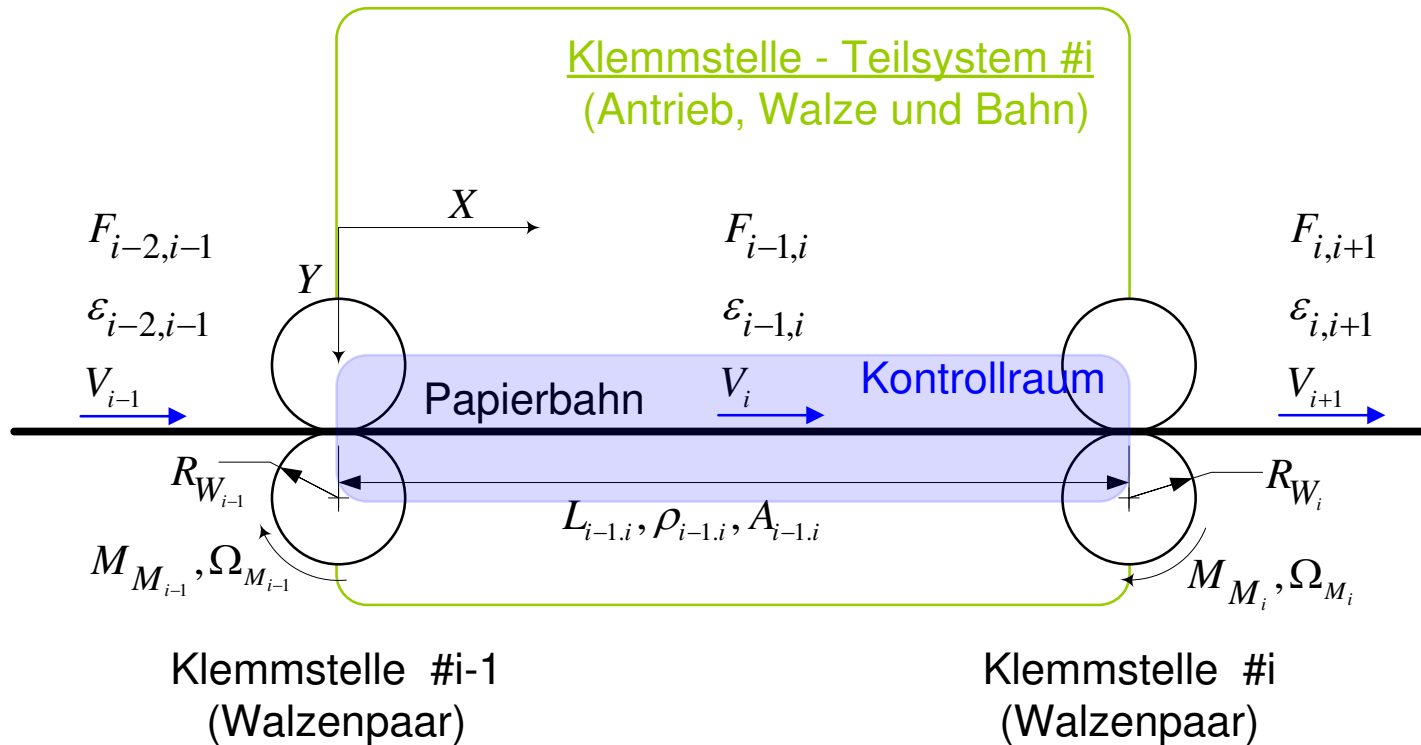


Abb. 6: Definition eines Teilsystems #i (Klemm- bzw. Umschlingungswalze bei Haftung)

Überblick &  
Forschungsziel

Anlage,  
Schnittstelle &  
Datensammlung

Modellierung  
und Analyse

Dezentrale  
Regelungs-  
konzepte

Rakelvorsteu-  
erung

Dezentrale  
Beobachter

Zusammen-  
fassung &  
Ausblick

# Systemmodellierung:

## 2.) Teilsystem #i (Klemmstelle)

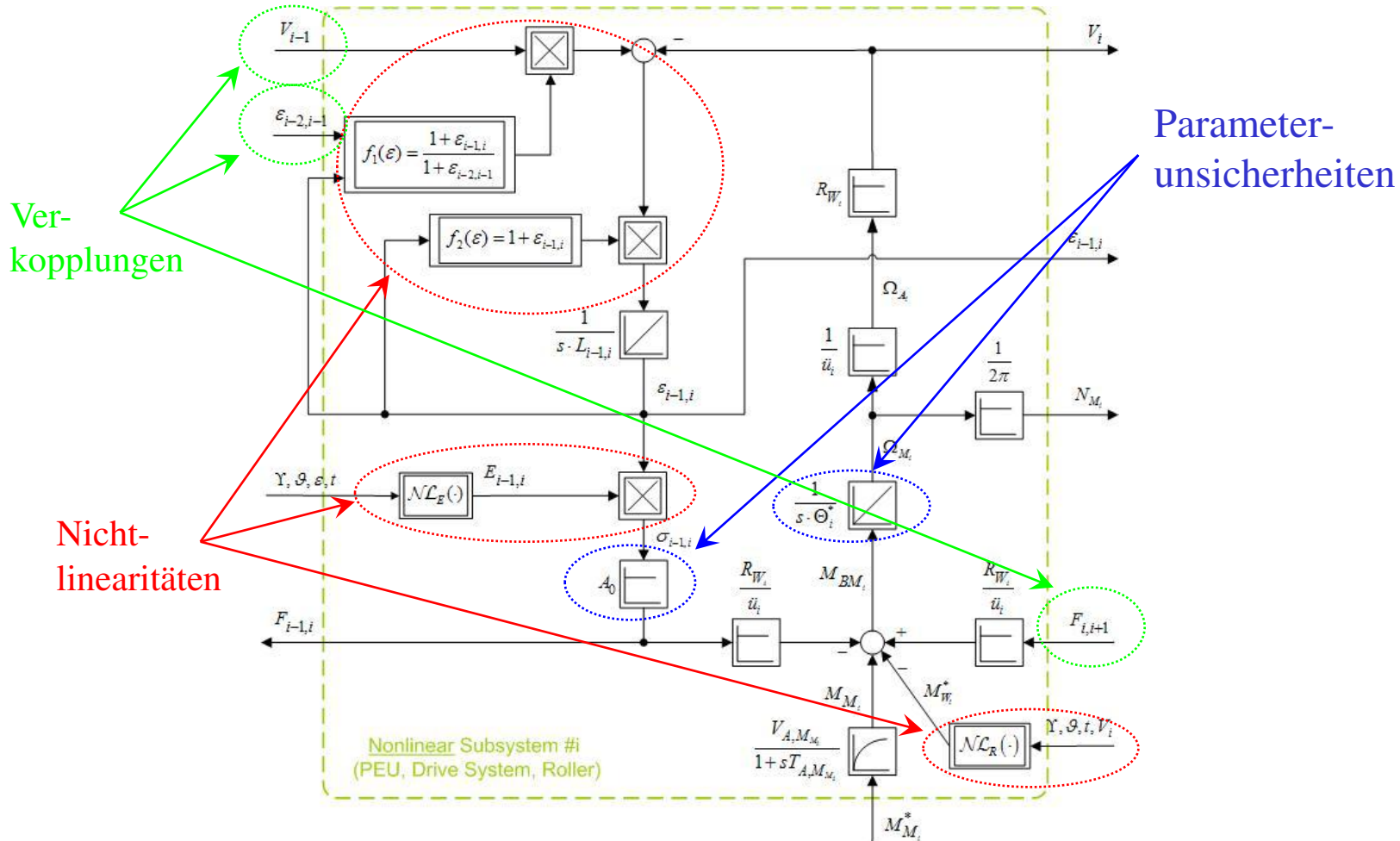


Abb. 7: Nichtlineares Blockdiagramm des Teilsystems #i (Klemm- bzw. Umschlingungswalze bei Haftung)

# Systemmodellierung:

## 3.) Eytelwein'sche Beziehung #i (Haftung oder Durchrutschen)

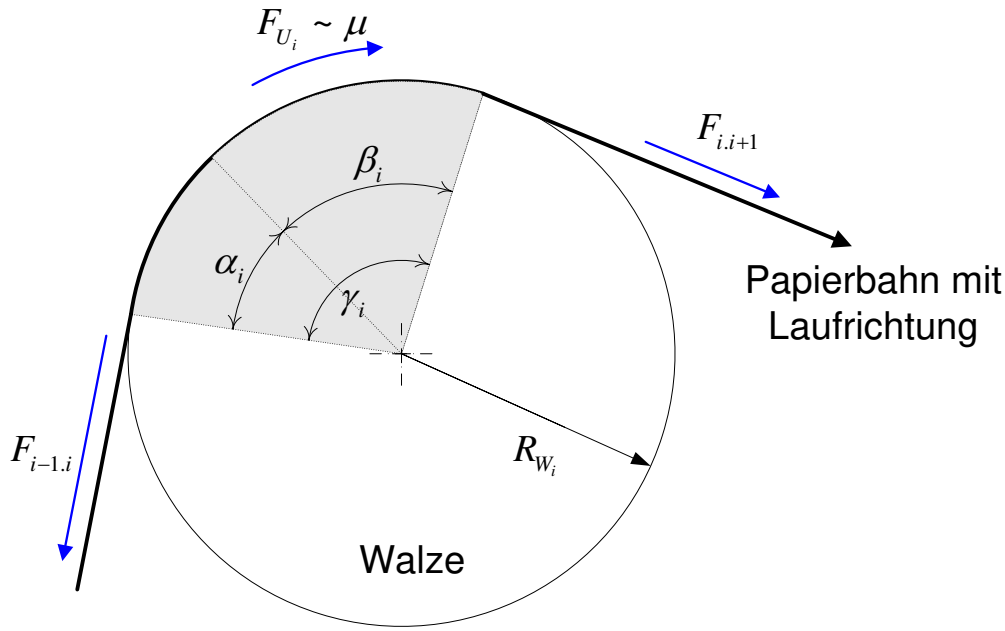


Abb. 8: Umschlungene Walze des Teilsystems #i mit Haft- und Gleitzone

Eytelwein Bedingung: 
$$\frac{F_{i,i+1}}{F_{i-1,i}} = e^{\beta_i \cdot \mu \cdot \text{sgn}(F_{U_i})} < e^{\gamma_i \cdot \mu \cdot \text{sgn}(F_{U_i})}$$

# Systemmodellierung:

## 4.) Querkräfte (Haftung oder Versatz)

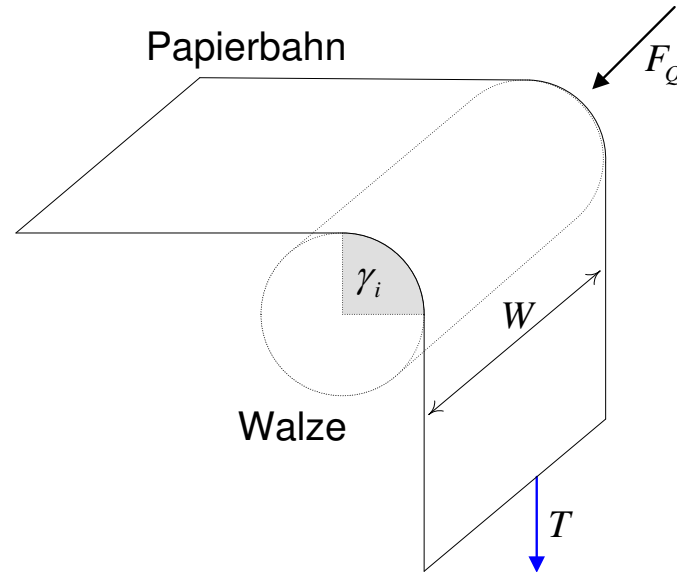


Abb. 9: Umschlungene Walze des Teilsystems #i bei Querkräften mit Bahnbreite  $W$  [m] und Bahnzug  $T$  [N/m]

Versatzbedingung  
bei Querkräften:

$$F_{Q_i} > \gamma_i \cdot \mu \cdot W \cdot T$$

# Systemmodellierung:

## VESTRA Anlage als MATLAB/SIMULINK Block (JetFlowF)

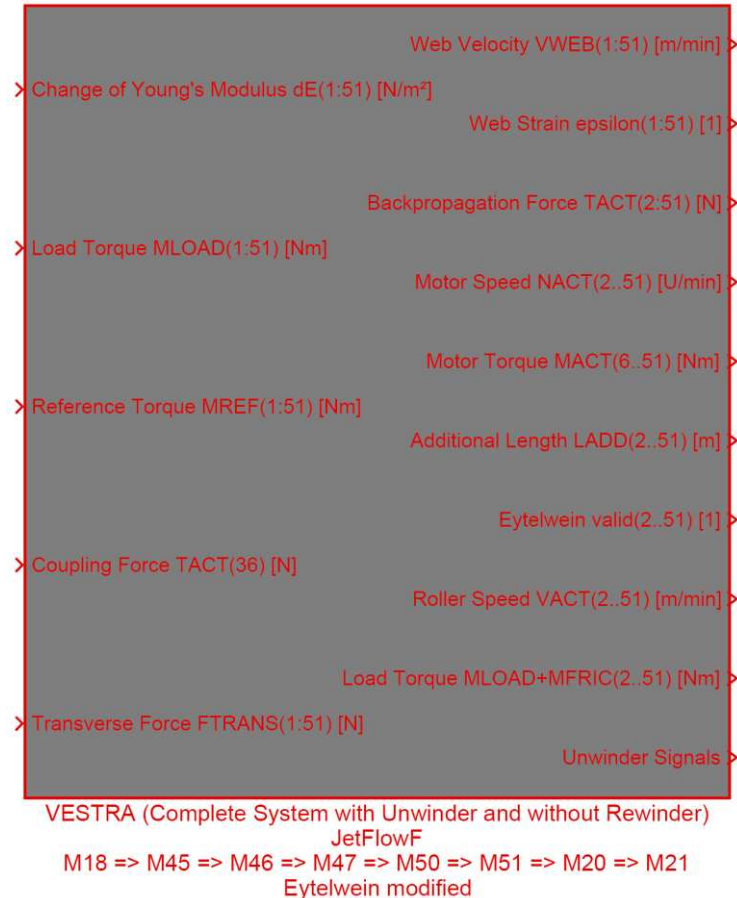


Abb. 10: Simulationsbaustein für gesamte VESTRA Anlage bei Betrieb mit JetFlowF

# Systemanalyse:

## Regelungstechnische Problemstellung

### Nichtlinearitäten & Unsicherheiten

- Beherrschbarkeit von Nichtlinearitäten (E-Moduländerung, Reibung)
- Robuste Regelung bzgl. Parameter - unsicherheiten und unterschied - lichen Arbeitspunkten
- Kompensation von Störungen
- Stellgrößenbegrenzungen (Maximales Motormoment)

### Verkopplungen

- Papierbahn verkoppelt die einzelnen Teilsysteme
- Ausbreitung von Störungen in bzw. entgegen der Transportrichtung (bis hin zur Aufwicklung)
- Zugschwankungen im Gesamtsystem (insbesondere bei *An- und Abfahren* und *An- und Ablegen des Rakels*)
- Aufschwingen und/oder Bahnriß

## Dezentrale Entkopplung und Rakelvorsteuerung

# Dezentrale Regelungskonzepte

## Aufbau und Funktionsprinzip

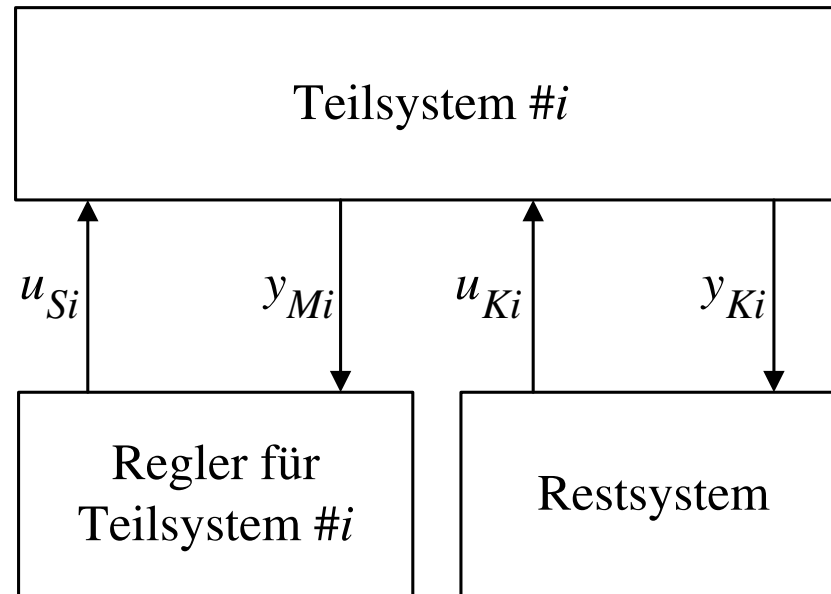


Abb. 11: Blockdiagramm zur dezentralen Regelung eines Teilsystems  $\#i$  bei Verkopplung mit Restsystem

# Momentane PI-Kaskaden-Regelung

## Empirische Auslegung (ohne Minimierung der Koppeleinflüsse)

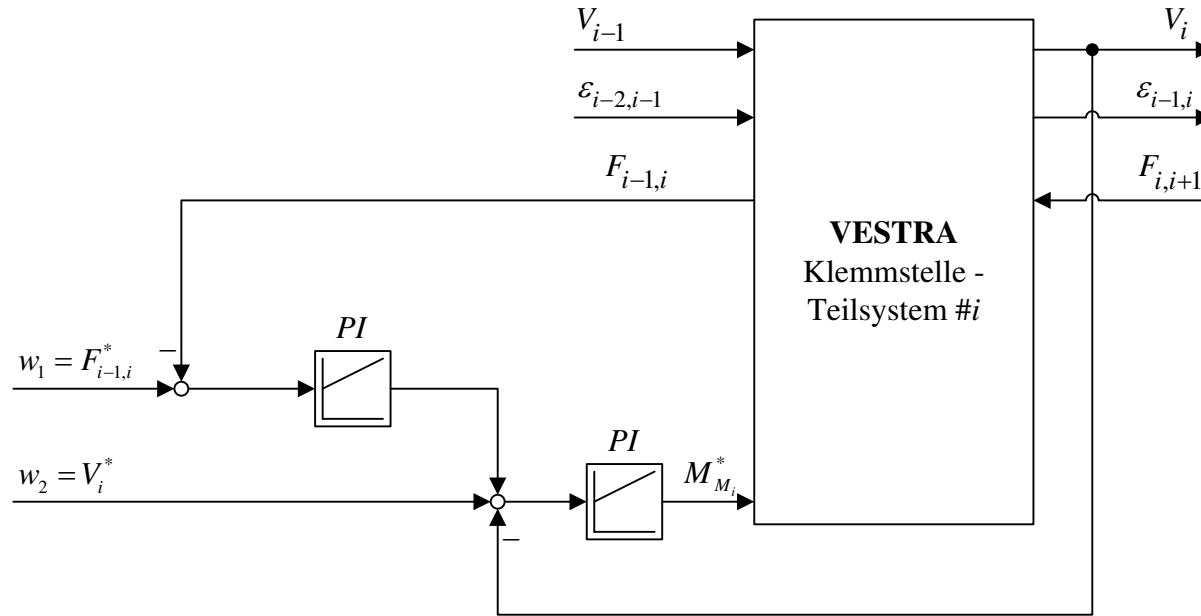


Abb. 12: Blockdiagramm der PI-Kaskadenregelung für Bahngeschwindigkeit und Bahnzug des Teilsystems #i

# Momentane PI-Kaskaden-Regelung (SIEMENS)

## PI-Regelungsbaustein in MATLAB/SIMULINK

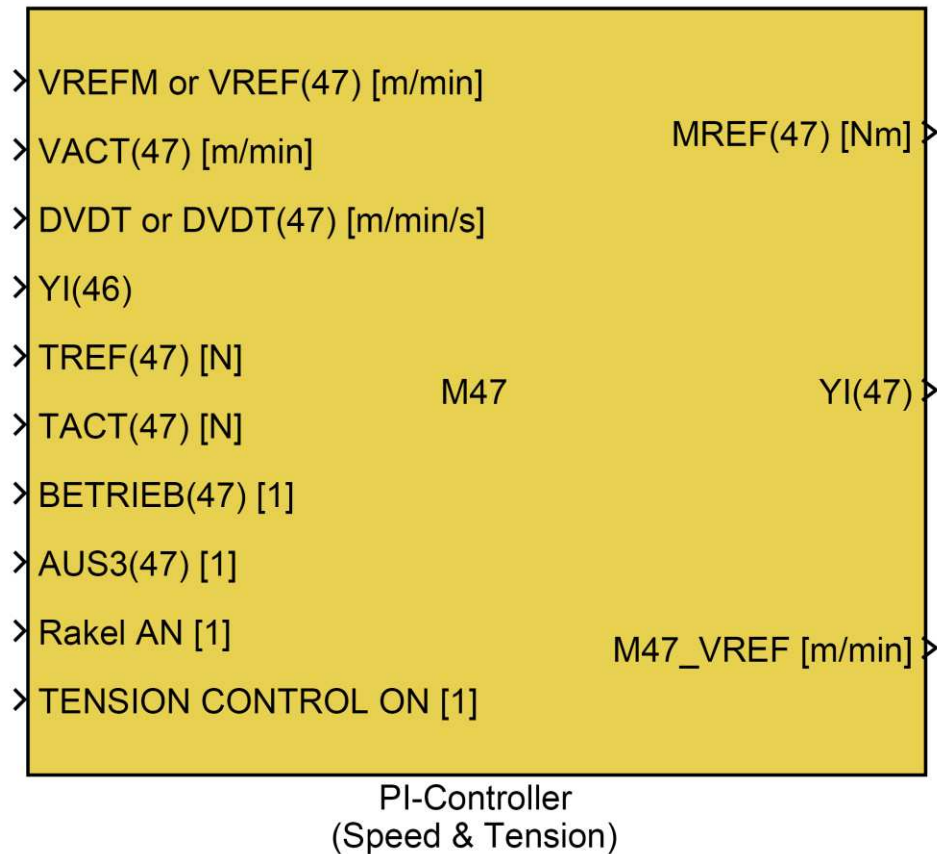


Abb. 12: Implementierungsbaustein der PI-Regelung (Empirische Auslegung, SIEMENS)

# Dezentrale Entkopplung

## Optimierte Zustandsregelung zur Minimierung der Koppelleinflüsse (Dezentraler Entwurf)

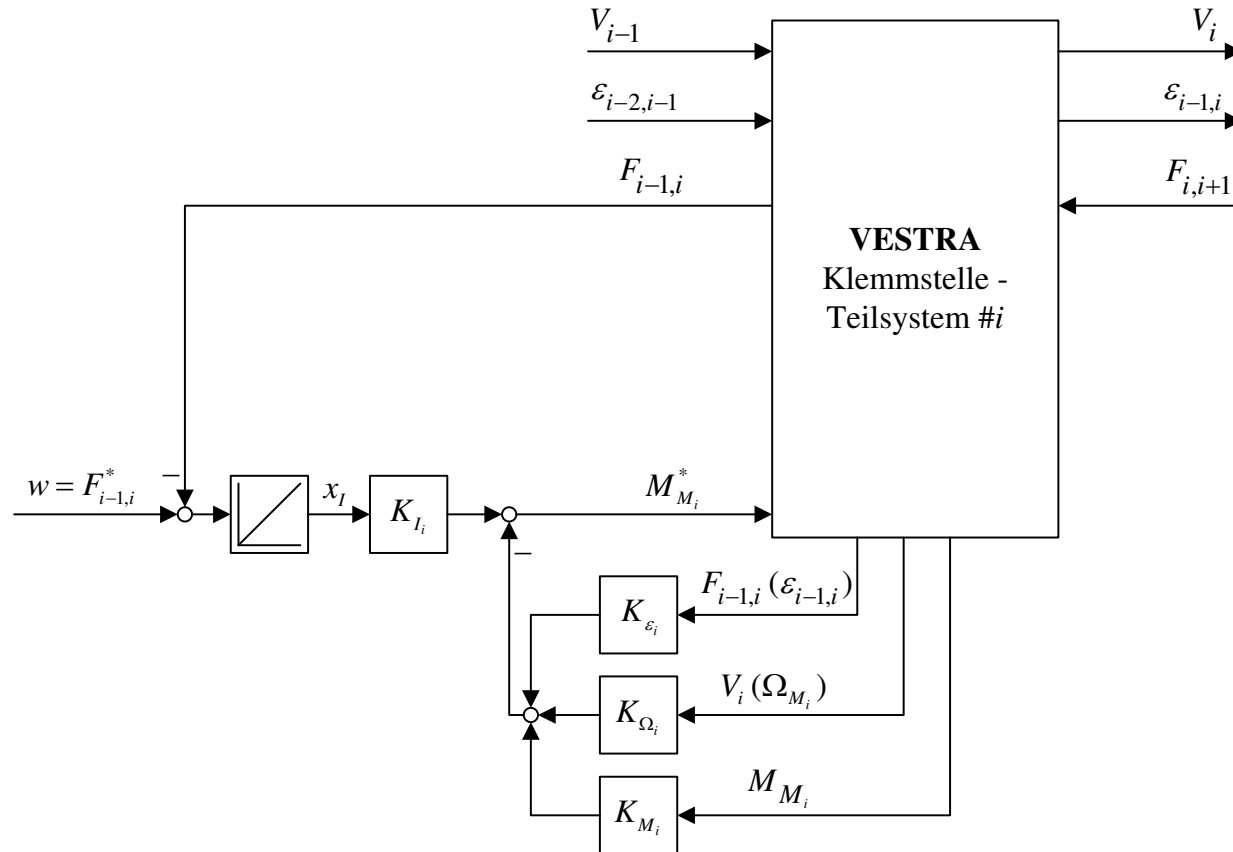
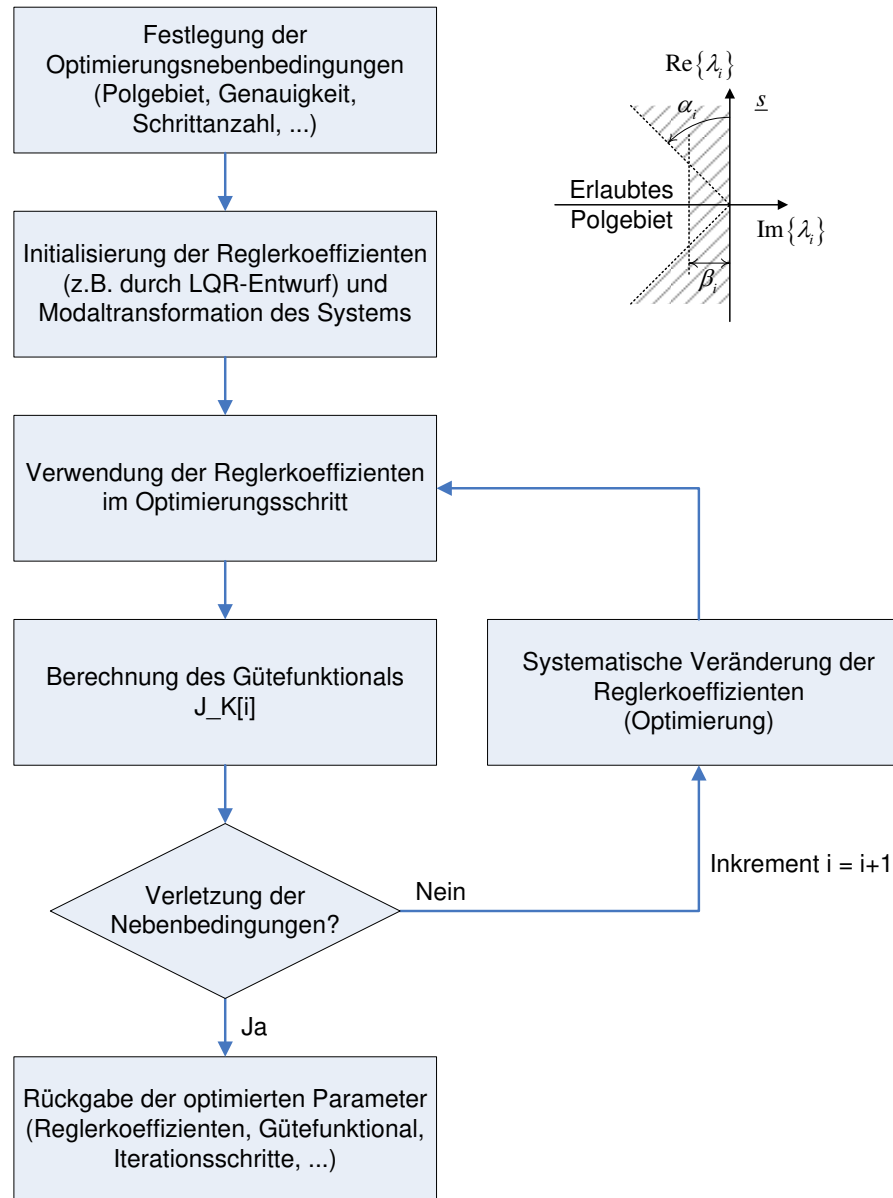


Abb. 13: Blockdiagramm der Dezentralen Entkopplung (optimierte Zustandsregelung) mit Führungsintegrator am Teilsystem #i (Dezentraler Entwurf)



Überblick &  
Forschungsziel

Anlage,  
Schnittstelle &  
Datensammlung

Modellierung  
und Analyse

Dezentrale  
Regelungs-  
konzepte

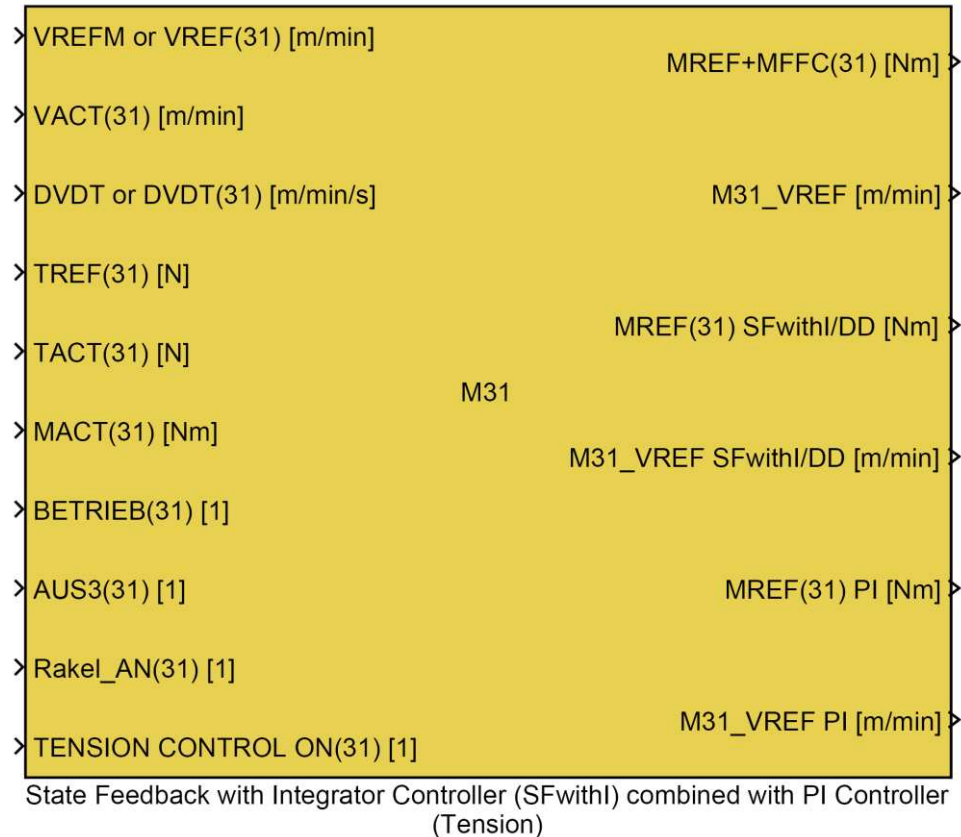
Rakelvorsteu-  
erung

Dezentrale  
Beobachter

Zusammen-  
fassung &  
Ausblick

# Dezentrale Entkopplung

## Zustandsregelungsbaustein in MATLAB/SIMULINK



Überblick &  
Forschungsziel

Anlage,  
Schnittstelle &  
Datensammlung

Modellierung  
und Analyse

Dezentrale  
Regelungs-  
konzepte

Rakelvorsteu-  
erung

Dezentrale  
Beobachter

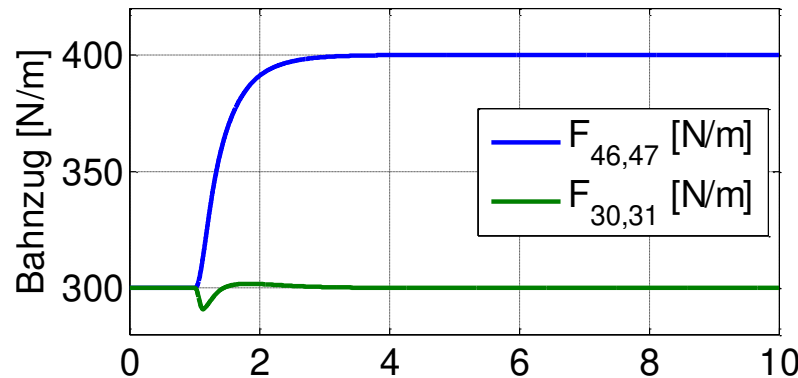
Zusammen-  
fassung &  
Ausblick

**Abb. 14: Implementierungsbaustein der Dezentralen Entkopplung (optimierte Zustandsregelung) mit Führungsintegrator am Teilsystem #i (Dezentraler Entwurf)**

# Dezentrale Entkopplung

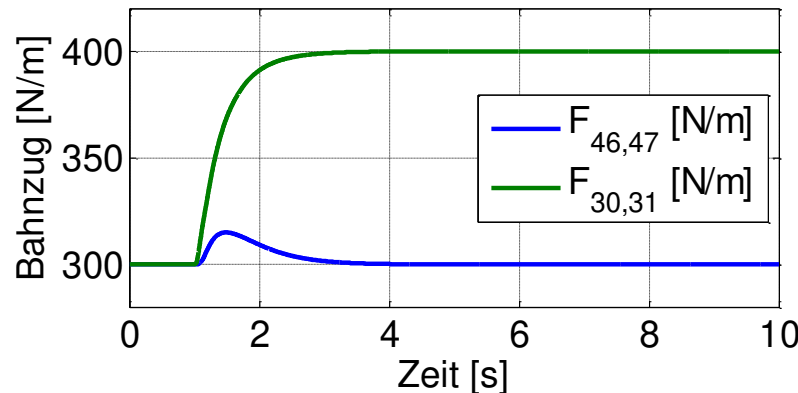
## Simulationsergebnisse für (sehr) gut ausgelegte Zustandsregelung (LQR)

LQR Zustandsregelung:  $F_{46,47}^* = 300 \text{ [N/m]} \rightarrow 400 \text{ [N/m]}$



$K_{\varepsilon}(47) = 1256458.0081$   
 $K_{\Omega}(47) = 13249.9711$   
 $K_M(47) = 9.3079$   
 $K_I(47) = -15.5912$   
 $J_k(47) = 2.7802$

LQR Zustandsregelung:  $F_{30,31}^* = 300 \text{ [N/m]} \rightarrow 400 \text{ [N/m]}$



$K_{\varepsilon}(31) = 681740.0879$   
 $K_{\Omega}(31) = 13302.2641$   
 $K_M(31) = 9.3885$   
 $K_I(31) = -13.3920$   
 $J_k(31) = 2.2682$

Überblick &  
Forschungsziel

Anlage,  
Schnittstelle &  
Datensammlung

Modellierung  
und Analyse

Dezentrale  
Regelungs-  
konzepte

Rakelvorsteu-  
erung

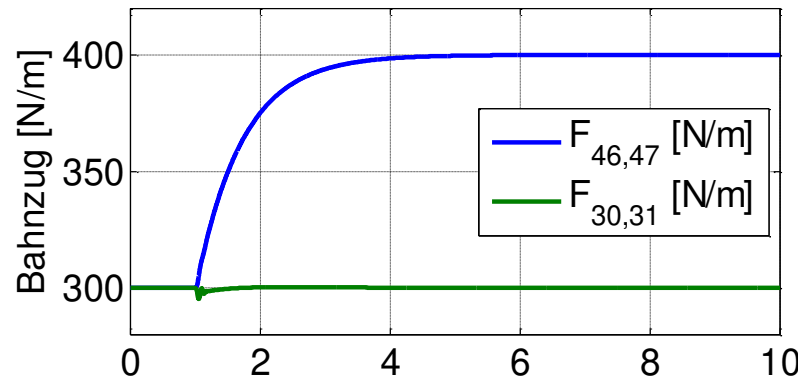
Dezentrale  
Beobachter

Zusammen-  
fassung &  
Ausblick

# Dezentrale Entkopplung

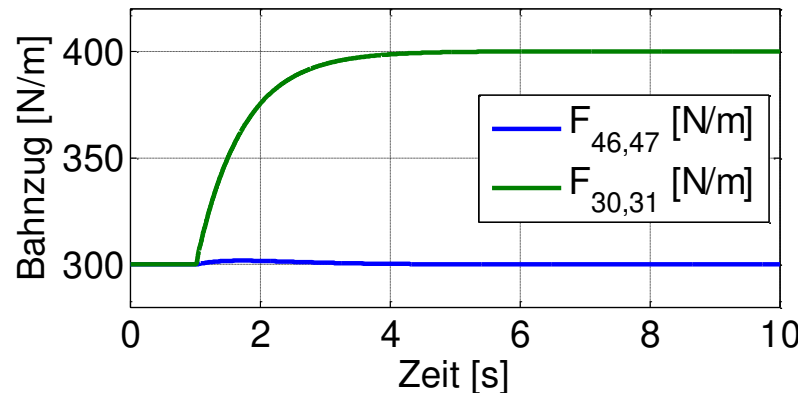
## Simulationsergebnisse für Dezentrale Entkopplung (nach Optimierung)

Dezentrale Entkopplung:  $F_{46,47}^* = 300 \text{ [N/m]} \rightarrow 400 \text{ [N/m]}$



$$\begin{aligned} K_{\varepsilon}(47) &= 2273080.1646 \\ K_{\Omega}(47) &= 3797.1544 \\ K_M(47) &= 0.5096 \\ K_I(47) &= -10.3881 \\ J_k(47) &= 0.6571 \end{aligned}$$

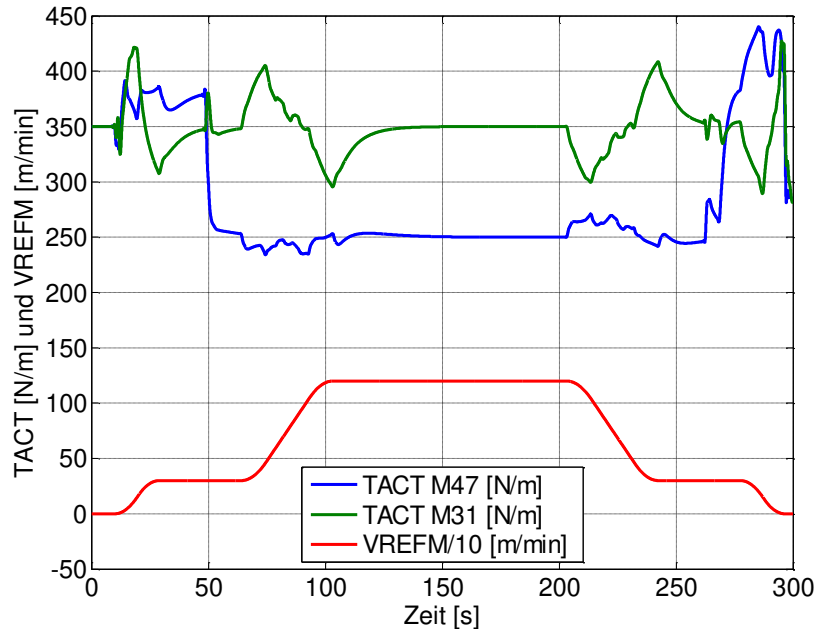
Dezentrale Entkopplung:  $F_{30,31}^* = 300 \text{ [N/m]} \rightarrow 400 \text{ [N/m]}$



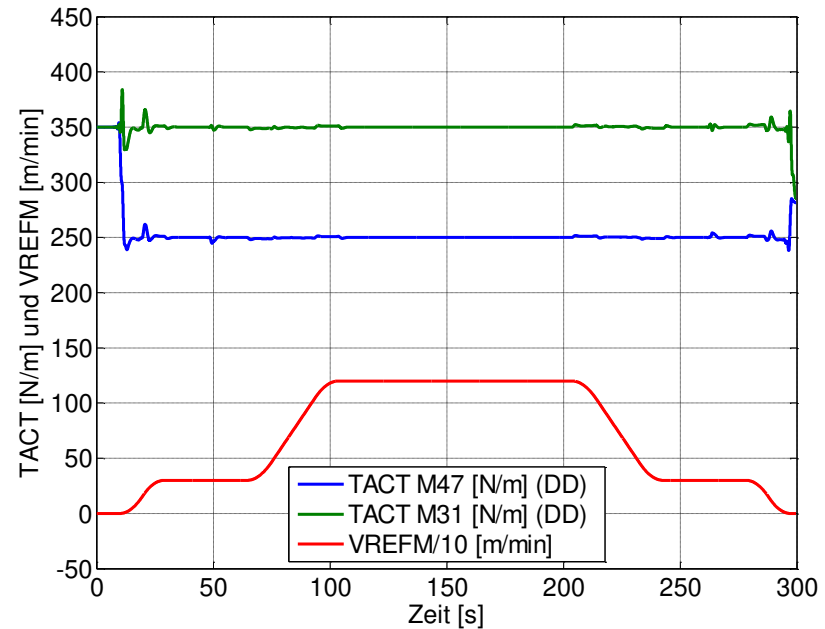
$$\begin{aligned} K_{\varepsilon}(31) &= 1462625.0495 \\ K_{\Omega}(31) &= 4634.5890 \\ K_M(31) &= 0.9504 \\ K_I(31) &= -7.3505 \\ J_k(31) &= 0.7383 \end{aligned}$$

# Vergleich PI-Regelung & Dezentrale Entkopplung

## Simulationsergebnisse



**PI-Kaskade (S5)**



**Dezentrale Entkopplung**

Überblick &  
Forschungsziel

Anlage,  
Schnittstelle &  
Datensammlung

Modellierung  
und Analyse

Dezentrale  
Regelungs-  
konzepte

Rakelvorsteu-  
erung

Dezentrale  
Beobachter

Zusammen-  
fassung &  
Ausblick

# Ausgewählte Messergebnisse: Versuchstage Überblick

| Versuchstag                   | Bemerkungen                           | Versuchsplan | Papierqualität | Medium |       | Dosierelement |      | Streichfarbe | Geschwindigkeit [m/min] | Zug - Regelung Variationen |             |             |
|-------------------------------|---------------------------------------|--------------|----------------|--------|-------|---------------|------|--------------|-------------------------|----------------------------|-------------|-------------|
|                               |                                       |              |                | Wasser | Farbe | Stiff         | Bent |              |                         | Referenz PI (S5)           | PI (dSPACE) | DD (dSPACE) |
| Vorversuche                   | Standardqualität Einfachstrich Offset |              | Q10            |        | X     | X             |      | 67           | 1200                    | X                          |             |             |
|                               | Standardqualität Einfachstrich Offset |              | Q10            |        | X     | X             |      | 67           | 1200                    | X                          |             |             |
|                               | Papierqualität Mehrfachstrich Offset  |              | Q20            |        | X     | X             |      | 68           | 1200                    | X                          |             |             |
|                               | Papierqualität Mehrfachstrich Offset  |              | Q20            |        | X     | X             |      | 68           | 1200                    | X                          |             |             |
| Versuchstag 1<br>(06.02.2007) | Antriebsgruppen einzeln               |              | ohne           |        |       |               |      |              | bis 2500                | X                          | X           | X           |
|                               | Gesamtanlage                          |              | ohne           |        |       |               |      |              | bis 2500                | X                          | X           | X           |
|                               | An- und Ablegen                       | Serie1: A-C  | Q10            | X      |       | X             |      |              | 300/800                 | X                          | X           | X           |
|                               | Beschleunigung                        |              | ohne           |        |       |               |      |              | bis 2500                | X                          | X           | X           |
| Versuchstag 2<br>(05.03.2007) | Überprüfung M47 (Lose und Welle)      | Serie 1      |                |        |       |               |      |              |                         |                            |             |             |
|                               | An- und Ablegen                       | Serie 2      | Q10            | X      |       | X             | X    |              | 300/800                 | X                          | X           | X           |
|                               | Test verschiedener Regelstrukturen    | Serie 2      | Q10            | X      |       | X             |      |              | 800                     | X                          | X           | X           |
|                               | Beobachter                            | Serie 3      | Q10            | X      |       |               |      |              | 300                     | X                          |             |             |
|                               | An- und Ablegen                       | Serie 4      | Q10            |        | X     | X             | X    | 67           | 300 - 1200              | X                          |             |             |
|                               | Beschleunigung                        | Serie 4      | Q10            |        | X     | X             |      | 67           | 300 - 1200              | X                          |             |             |
| Versuchstag 3<br>(21.03.2007) | Aktivierung Zugregelung M47           | Serie 1      | Q10            | X      |       | X             |      |              | 300/800                 | X                          |             |             |
|                               | Beobachter                            | Serie 2      | Q10            | X      |       | X             |      |              | 300/800                 | X                          | X           | X           |
|                               | Verschiedene Einstellungen            | Serie 3      | Q10            | X      |       | X             |      |              | 300/800                 | X                          | X           | X           |
|                               | An- und Ablegen                       | Serie 4      | Q10            | X      |       | X             | X    |              | 300/800                 | X                          | X           | X           |
|                               | An- und Ablegen                       | Serie 5      | Q10            |        | X     | X             | X    |              | 300 - 1200              | X                          | X           | X           |
|                               | Standardqualität Einfachstrich Offset | Serie 7      | Q10            |        | X     | X             |      | 67           | 1200                    | X                          | X           | X           |
|                               | Beschleunigung und Ablegen            | Serie 7      | Q10            |        | X     | X             |      | 65           | 1800                    | X                          |             | X           |
|                               |                                       |              |                |        |       |               |      |              |                         |                            |             |             |
| Versuchstag 4<br>(28.03.2007) | Beobachter                            | Serie 1      | Q10            |        | X     | X             |      | 67           | 300 - 1800              | X                          |             |             |
|                               | An- und Ablegen                       | Serie 2      | Q10            |        | X     | X             | X    | 67           | 300 - 1200              | X                          | X           | X           |
|                               | verschiedene Papierqualitäten         | Serie 3      | Q30            |        | X     | X             |      | 65           | 1200                    | X                          | X           | X           |
|                               | verschiedene Papierqualitäten         | Serie 4      | Q50            |        | X     | X             |      | 65           | 1000                    | X                          | X           | X           |
|                               | verschiedene Papierqualitäten         | Serie 5      | Q60            |        | X     | X             |      | 65           | 1000                    | X                          | X           | X           |
|                               | verschiedene Papierqualitäten         | Serie 6      | Q40            |        | X     |               | X    | 65           | 600                     | X                          | X           | X           |
| Versuchstag 5<br>(20.04.2007) | An- und Ablegen                       | Serie 1      | Q10            |        | X     | X             | X    | 67           | 300-1200                | X                          | X           | X           |
|                               | verschiedene Papierqualitäten         | Serie 2      | Q40            |        | X     |               | X    | 65           | 600                     |                            |             | X           |
|                               | verschiedene Papierqualitäten         | Serie 2      | Q200           |        | X     |               | X    | 68           | 600                     | X                          | X           | X           |
|                               | verschiedene Papierqualitäten         | Serie 2      | Q20            |        | X     | X             |      | 68           | 1200                    | X                          | X           | X           |
|                               | Standardqualität Einfachstrich Offset | Serie 2      | Q10            |        | X     | X             |      | 67           | 1200                    | X                          | X           | X           |
|                               | Papierqualität Mehrfachstrich Offset  | Serie 2      | Q20            |        | X     | X             |      | 68           | 1200                    | X                          |             | X           |
|                               | Papierqualität Mehrfachstrich Offset  | Serie 2      | Q20            |        | X     | X             |      | 62           | 2500                    | X                          |             | X           |

Überblick & Forschungsziel

Anlage, Schnittstelle & Datensammlung

Modellierung und Analyse

Dezentrale Regelungskonzepte

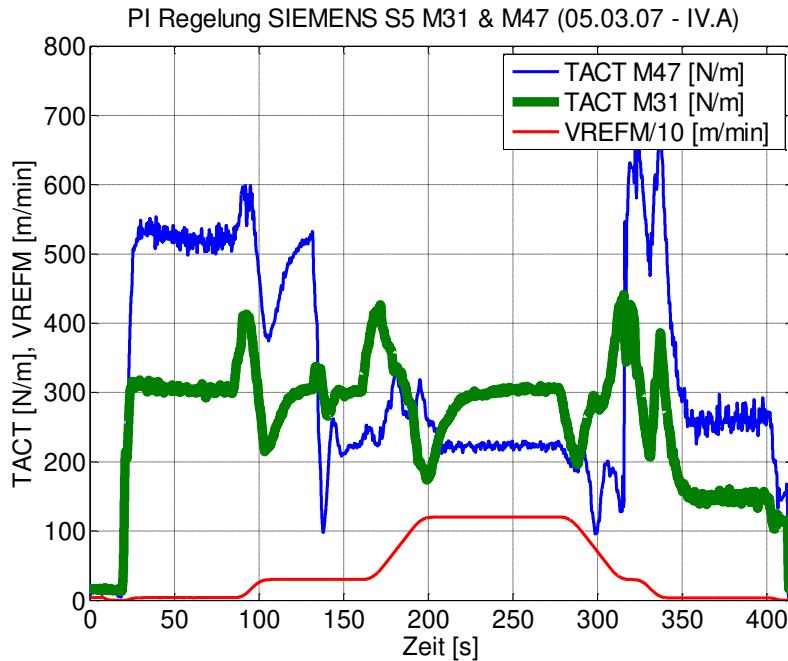
Rakelvorsteuerung

Dezentrale Beobachter

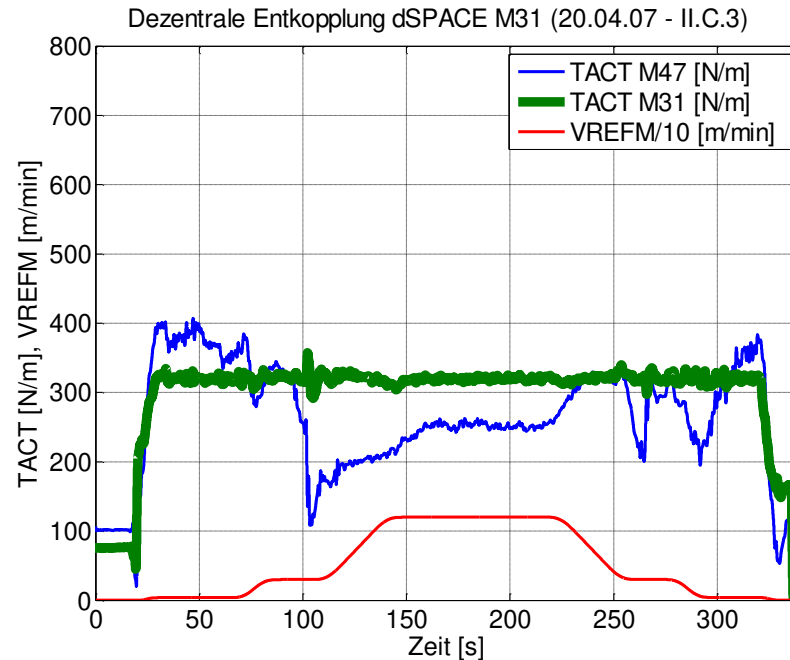
Zusammenfassung & Ausblick

# Vergleich PI-Regelung & Dezentrale Entkopplung

## Ausgewählte Messergebnisse: Q10 – Vergleich



**PI-Kaskade (S5)**



**Dezentrale Entkopplung (dSPACE)**

Überblick &  
Forschungsziel

Anlage,  
Schnittstelle &  
Datensammlung

Modellierung  
und Analyse

Dezentrale  
Regelungs-  
konzepte

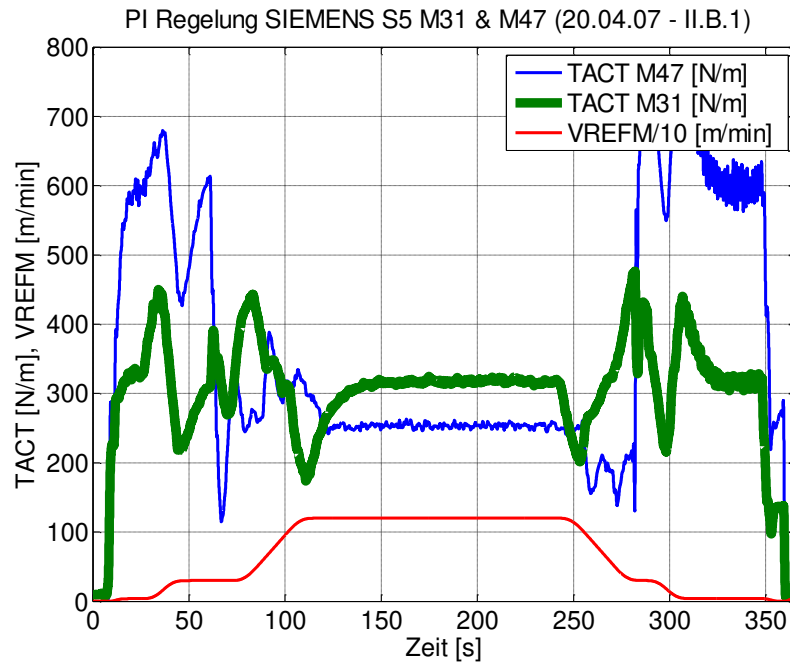
Rakelvorsteu-  
erung

Dezentrale  
Beobachter

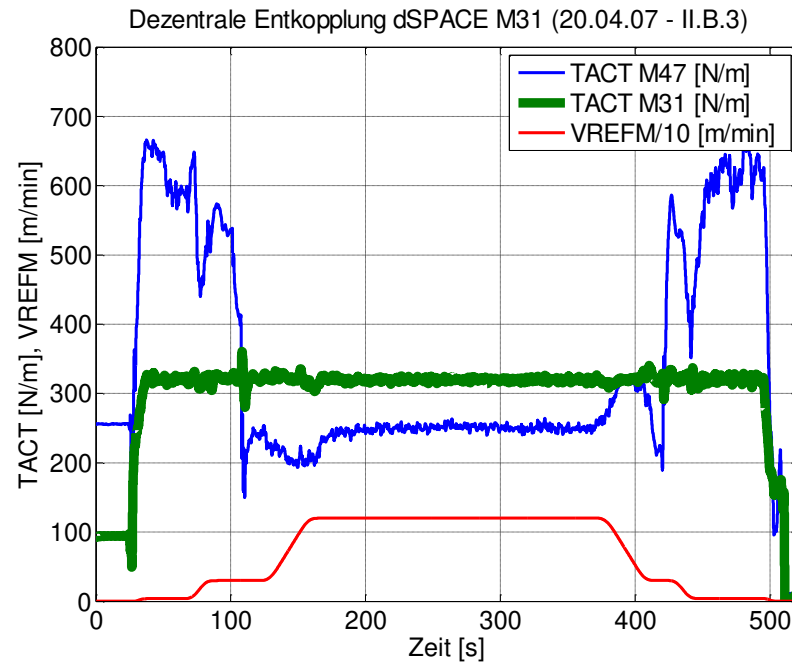
Zusammen-  
fassung &  
Ausblick

# Vergleich PI-Regelung & Dezentrale Entkopplung

## Ausgewählte Messergebnisse: Q20 – Vergleich



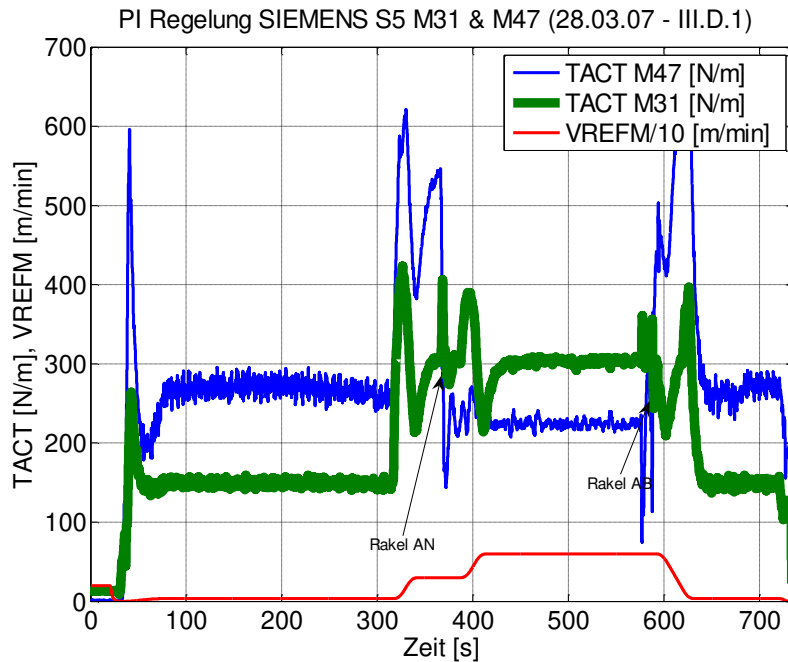
**PI-Kaskade (S5)**



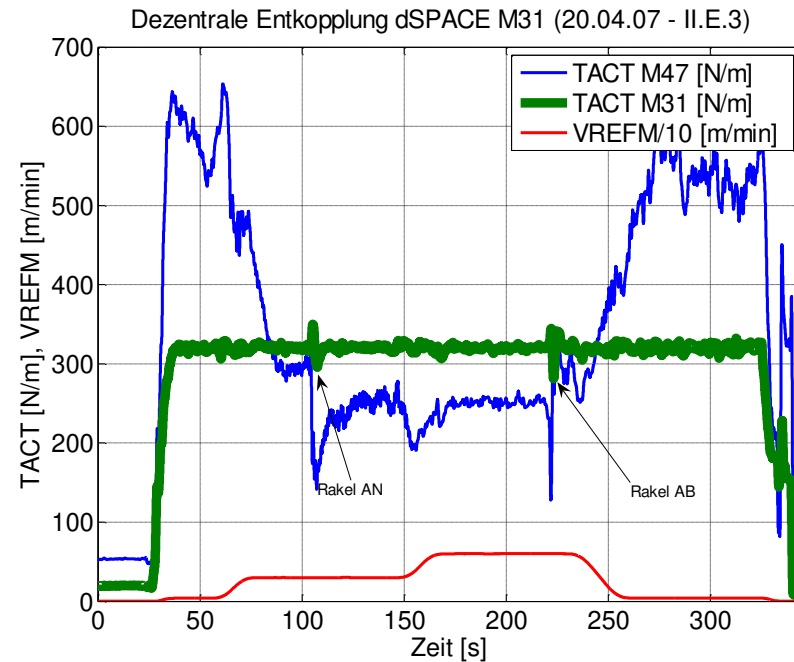
**Dezentrale Entkopplung (dSPACE)**

# Vergleich PI-Regelung & Dezentrale Entkopplung

## Ausgewählte Messergebnisse: Q40 – Vergleich



**PI-Kaskade (S5)**



**Dezentrale Entkopplung (dSPACE)**

Überblick &  
Forschungsziel

Anlage,  
Schnittstelle &  
Datensammlung

Modellierung  
und Analyse

Dezentrale  
Regelungs-  
konzepte

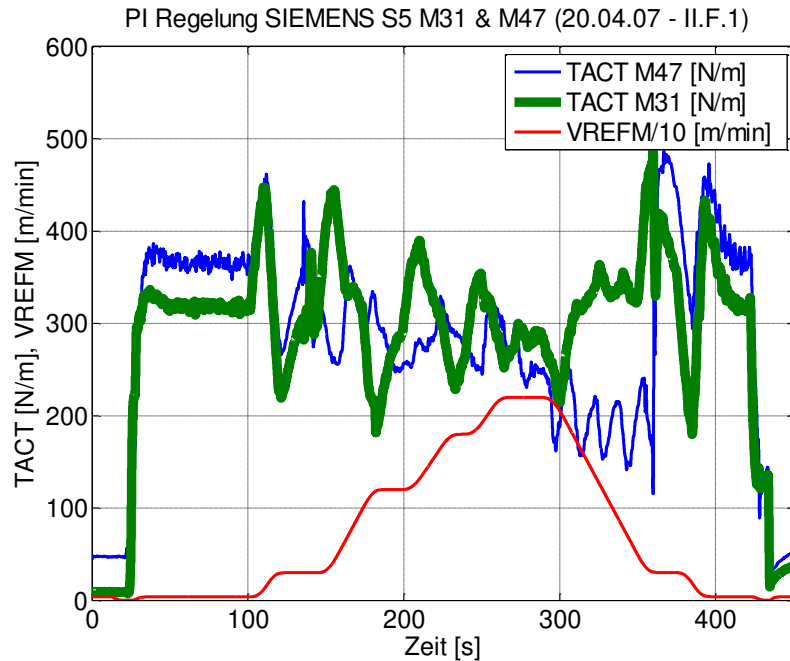
Rakelvorsteu-  
erung

Dezentrale  
Beobachter

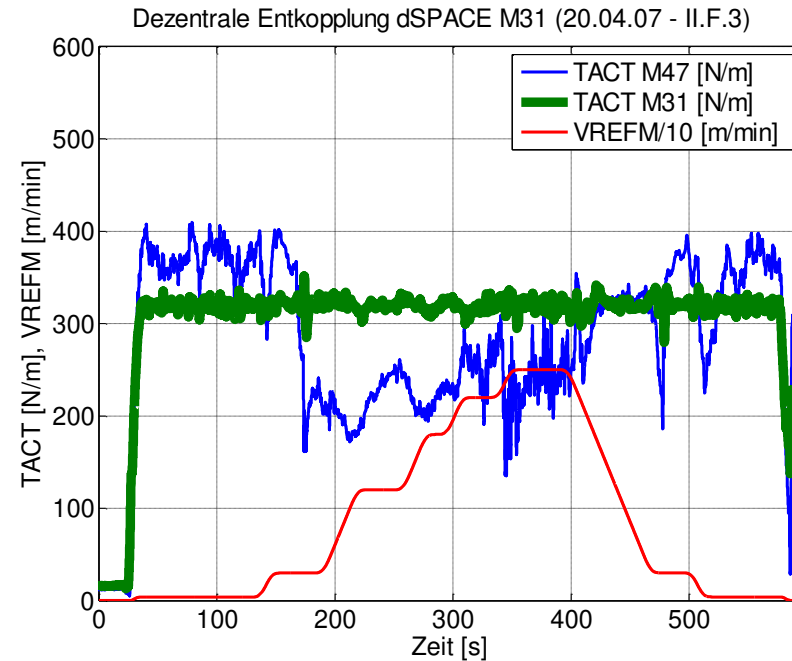
Zusammen-  
fassung &  
Ausblick

# Vergleich PI-Regelung & Dezentrale Entkopplung

## Ausgewählte Messergebnisse: Q20 – Vergleich (Maximale Geschwindigkeit)



**PI-Kaskade (S5)**



**Dezentrale Entkopplung (dSPACE)**

# Rakelvorsteuerung (Störgrößenaufschaltung)

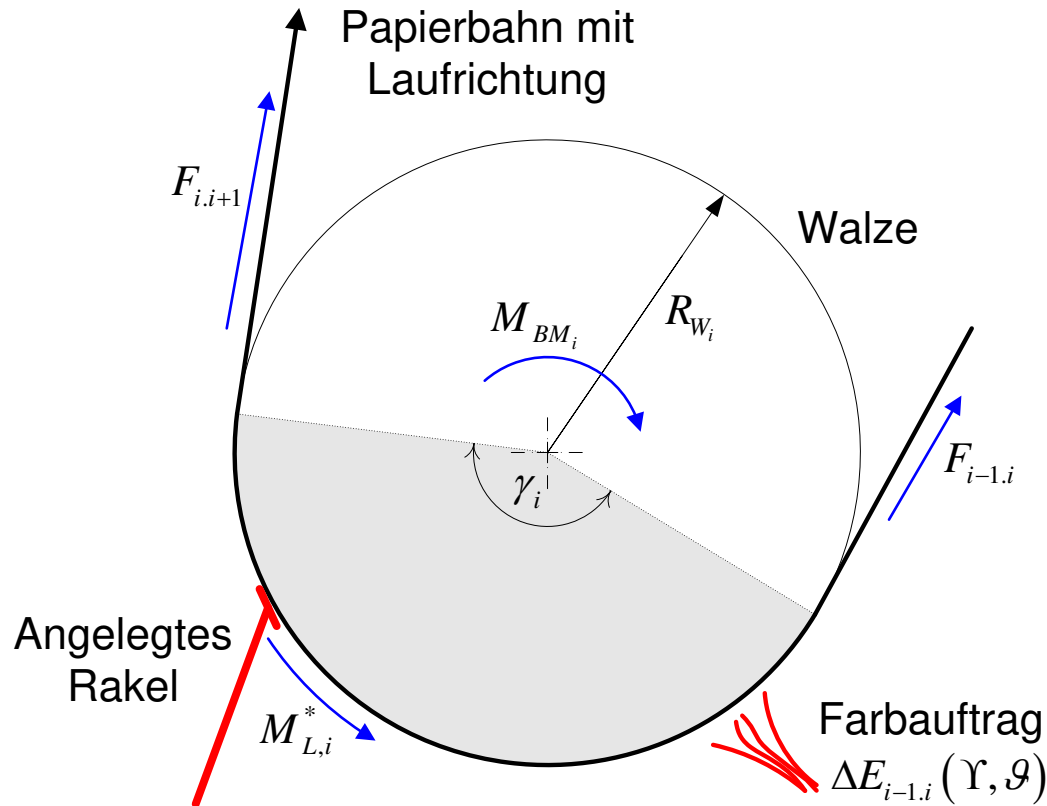


Abb. 14: Auftragsaggregat M47 (JetflowF) beim Anlegen des Rakels (Lastmoment) und Beginn des Farbauftrages (E-Moduländerung)

Überblick & Forschungsziel

Anlage, Schnittstelle & Datensammlung

Modellierung und Analyse

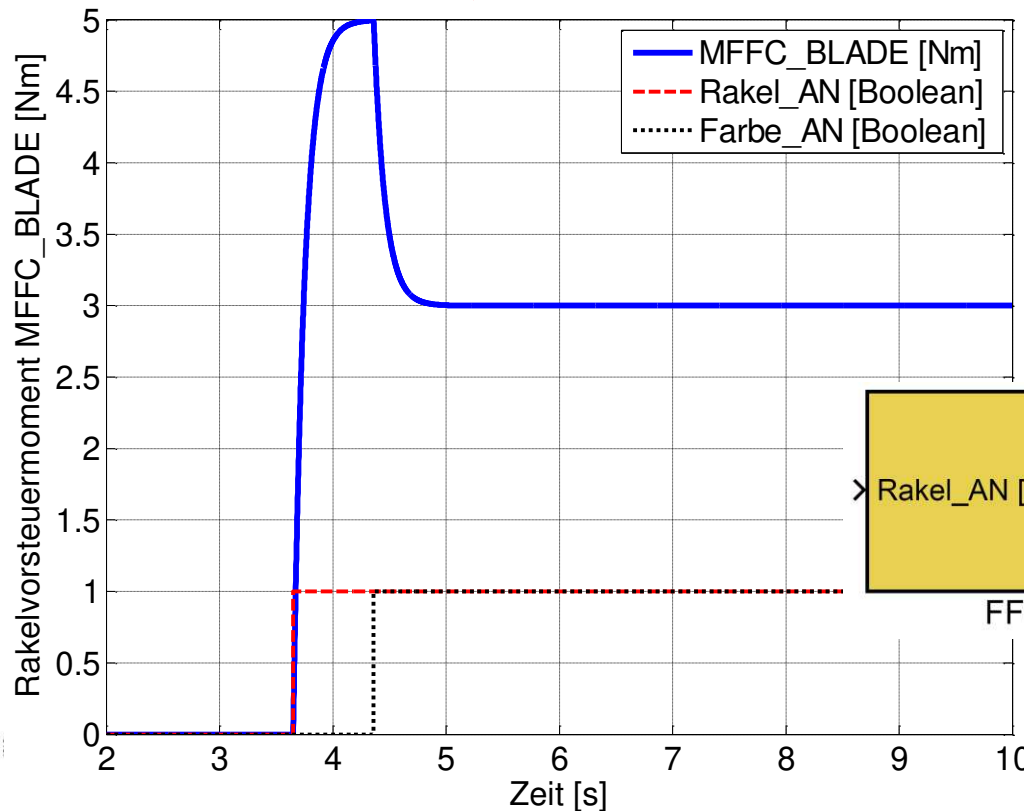
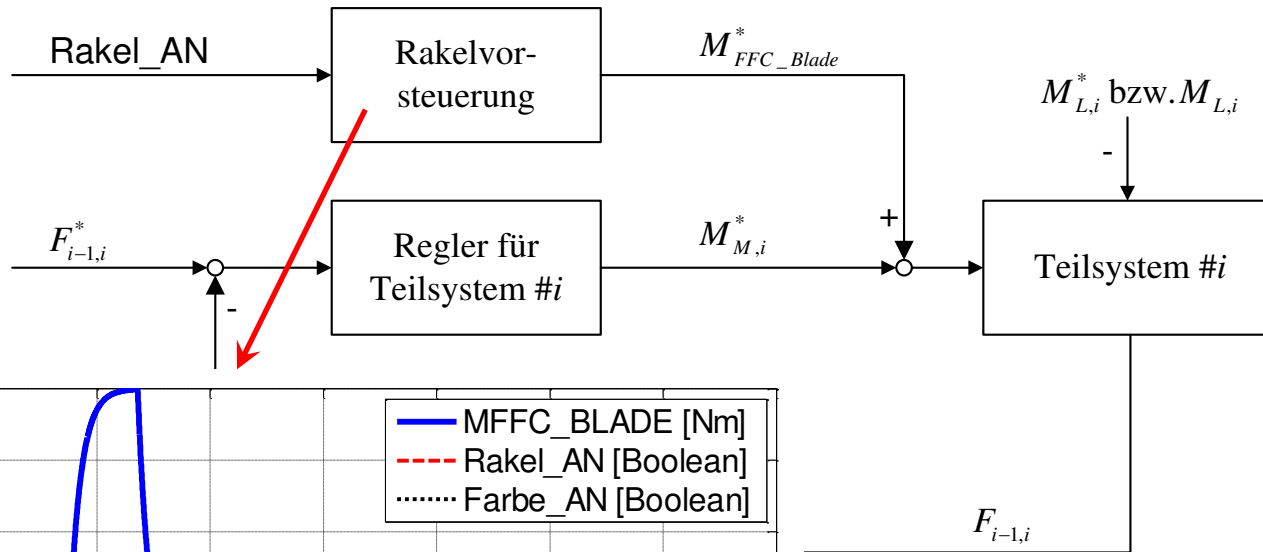
Dezentrale Regelungskonzepte

Rakelvorsteuerung

Dezentrale Beobachter

Zusammenfassung & Ausblick

# Rakelvorsteuerung (Störgrößenaufschaltung)



vom implementierten Regler wird ein  
gt



FFC for Load Torque (Blade)

Überblick &  
Forschungsziel

Anlage,  
Schnittstelle &  
Datensammlung

Modellierung  
und Analyse

Dezentrale  
Regelungs-  
konzepte

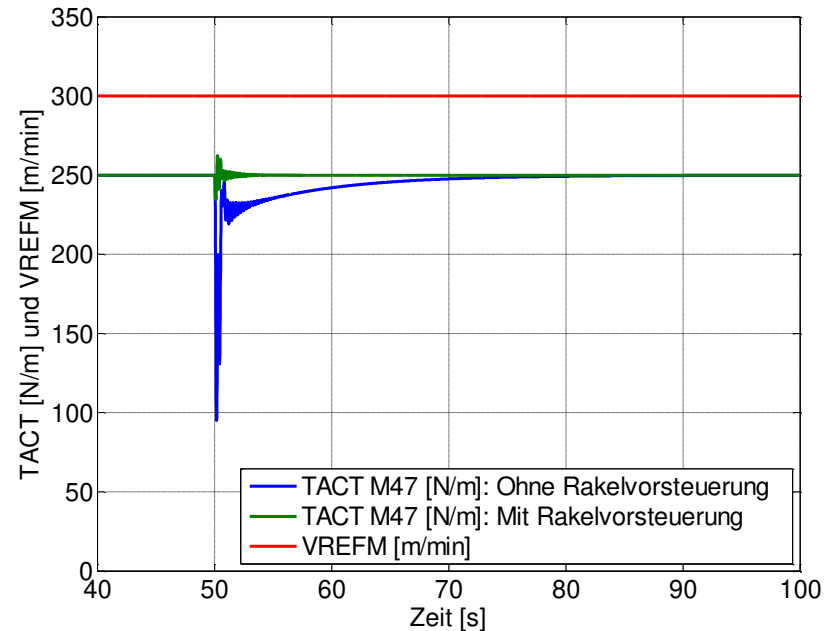
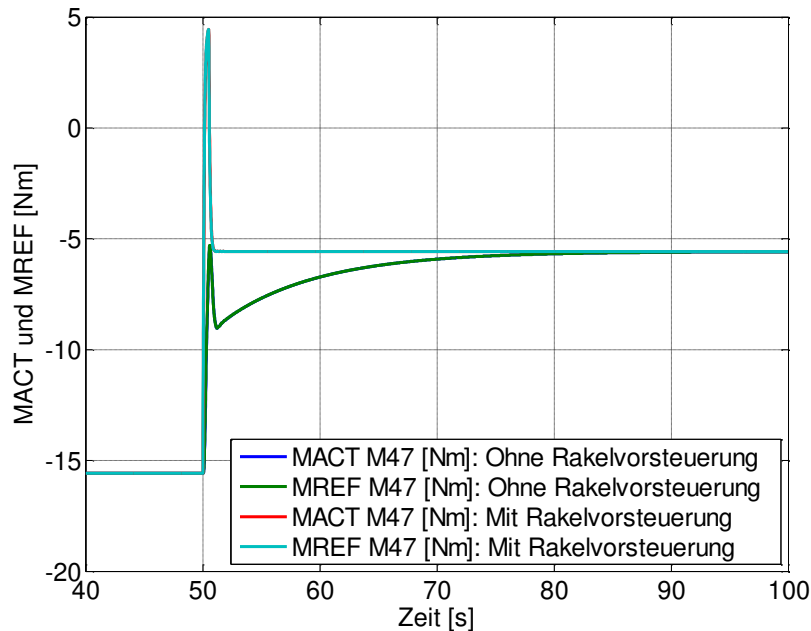
Rakelvorsteu-  
erung

Dezentrale  
Beobachter

Zusammen-  
fassung &  
Ausblick

# Rakelvorsteuerung (Störgrößenaufschaltung)

Simulationsergebnisse für Bentblade – An- & Ablegen bei 300 m/min



Überblick &  
Forschungsziel

Anlage,  
Schnittstelle &  
Datensammlung

Modellierung  
und Analyse

Dezentrale  
Regelungs-  
konzepte

Rakelvorsteu-  
erung

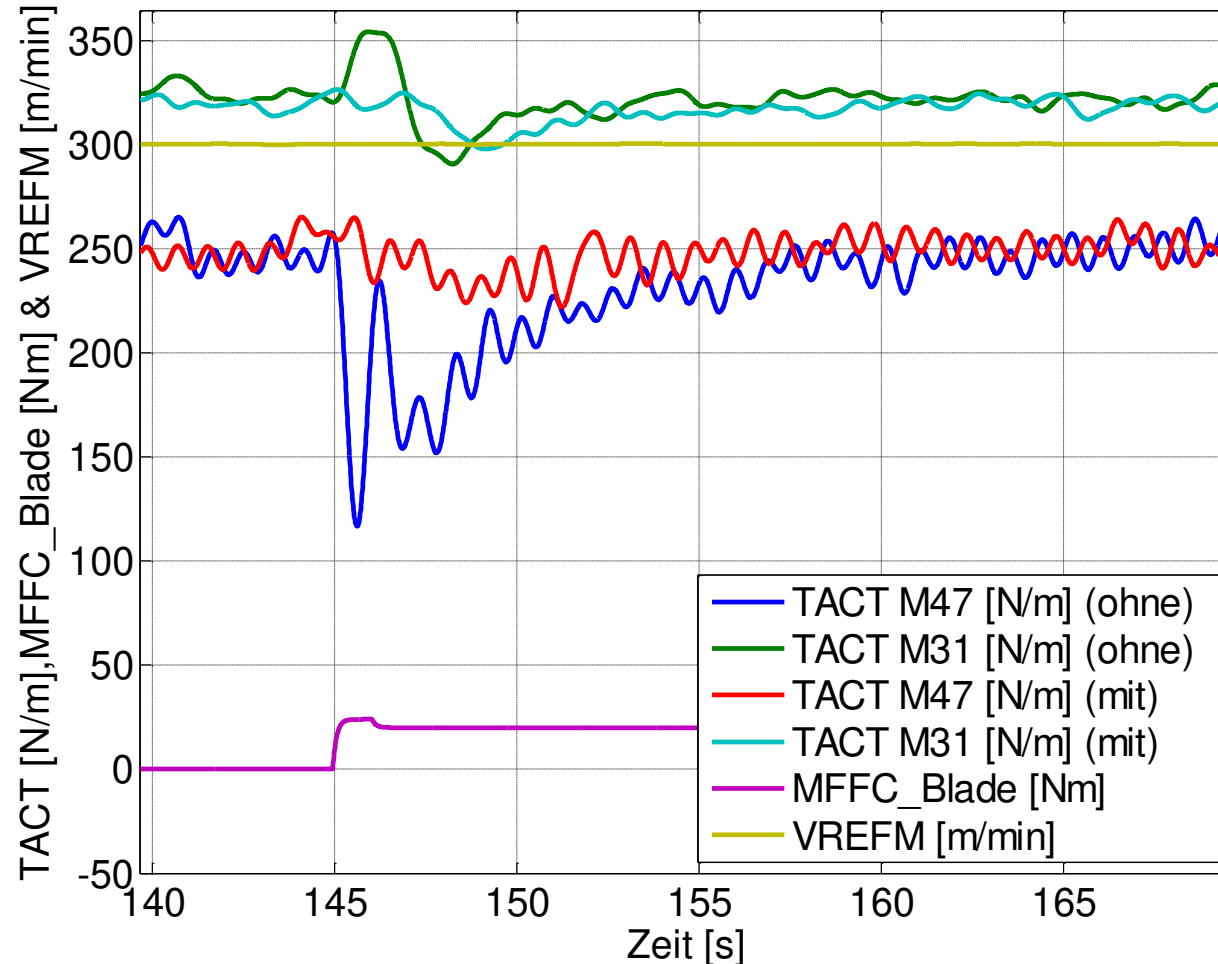
Dezentrale  
Beobachter

Zusammen-  
fassung &  
Ausblick

# Erweiterung: Rakelvorsteuerung (Störgrößenaufschaltung)

## Messergebnisse für Stiffblade – An- & Ablegen bei 300 m/min

Rakelvorsteuerung VESTRA Stiffblade (20.04.07 - I.A.)



Überblick &  
Forschungsziel

Anlage,  
Schnittstelle &  
Datensammlung

Modellierung  
und Analyse

Dezentrale  
Regelungs-  
konzepte

Rakelvorsteu-  
erung

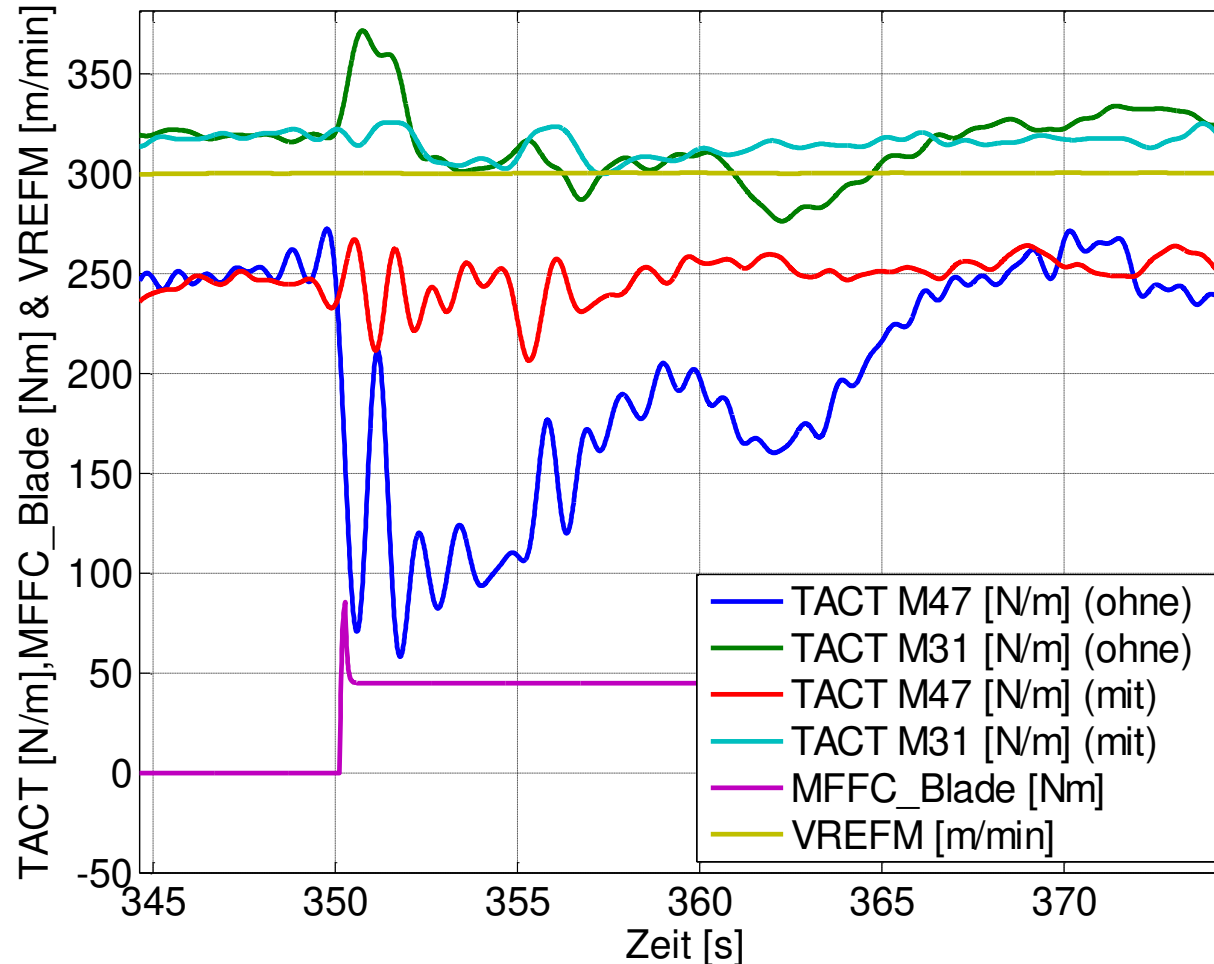
Dezentrale  
Beobachter

Zusammen-  
fassung &  
Ausblick

# Rakelvorsteuerung (Störgrößenaufschaltung)

## Messergebnisse für Bentblade – An- & Ablegen bei 300 m/min

Rakelvorsteuerung VESTRA Bentblade (20.04.07 - I.B)



# Dezentrale Störgrößenbeobachter

## Aufbau und Funktionsprinzip

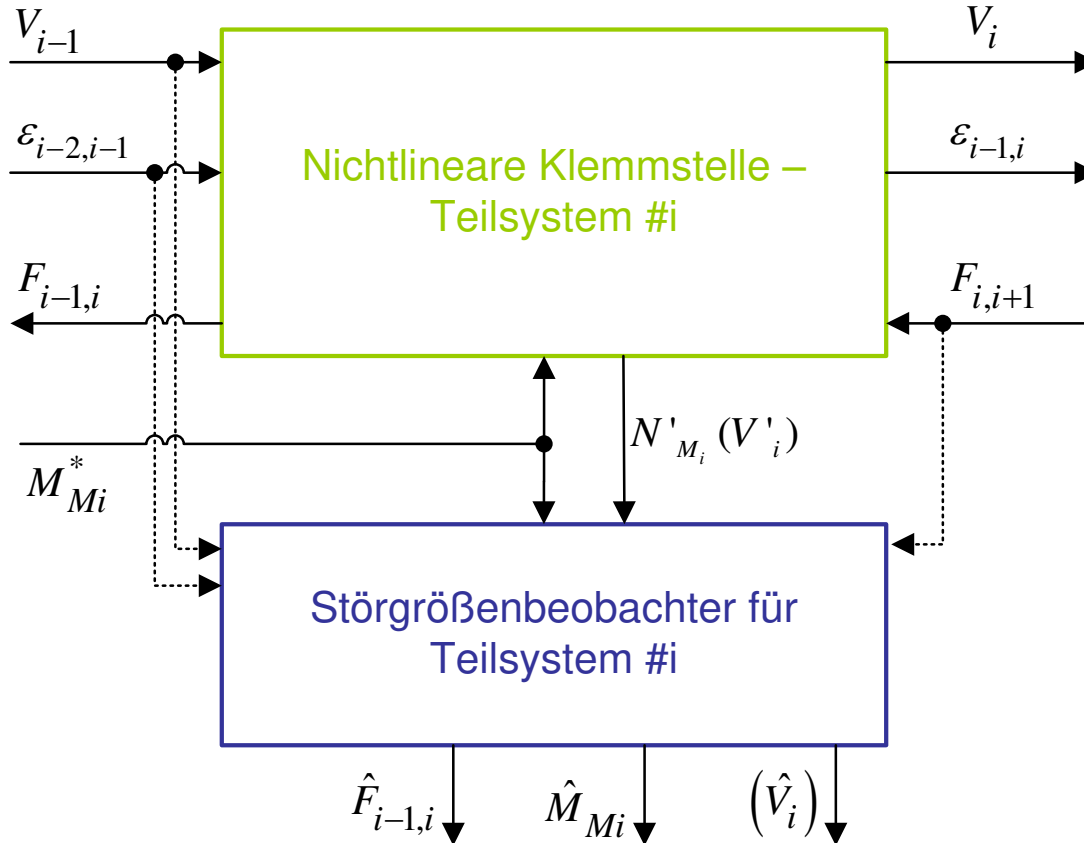


Abb. 15: Blockschaltbild eines dezentralen Störgrößenbeobachters für Teilsystem #i

# Dezentrale Störgrößenbeobachter

## Störgrößenbeobachterbaustein in MATLAB/SIMULINK

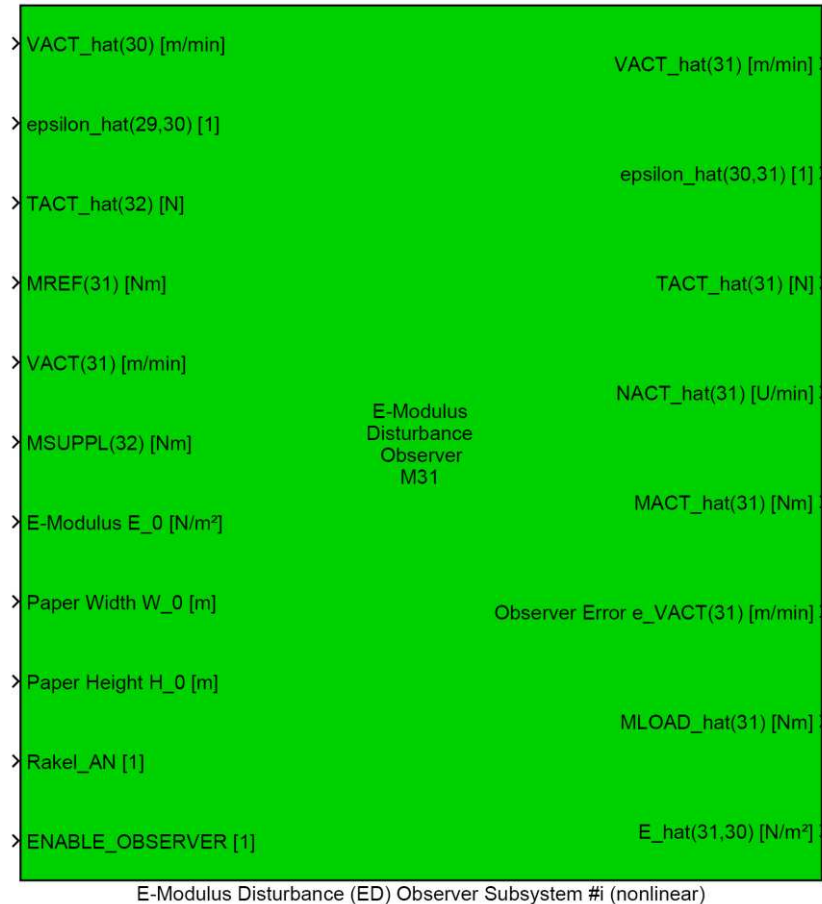


Abb. 16: Blockschaltbild eines dezentralen Störgrößenbeobachters für Teilsystem #i

Überblick &  
Forschungsziel

Anlage,  
Schnittstelle &  
Datensammlung

Modellierung  
und Analyse

Dezentrale  
Regelungs-  
konzepte

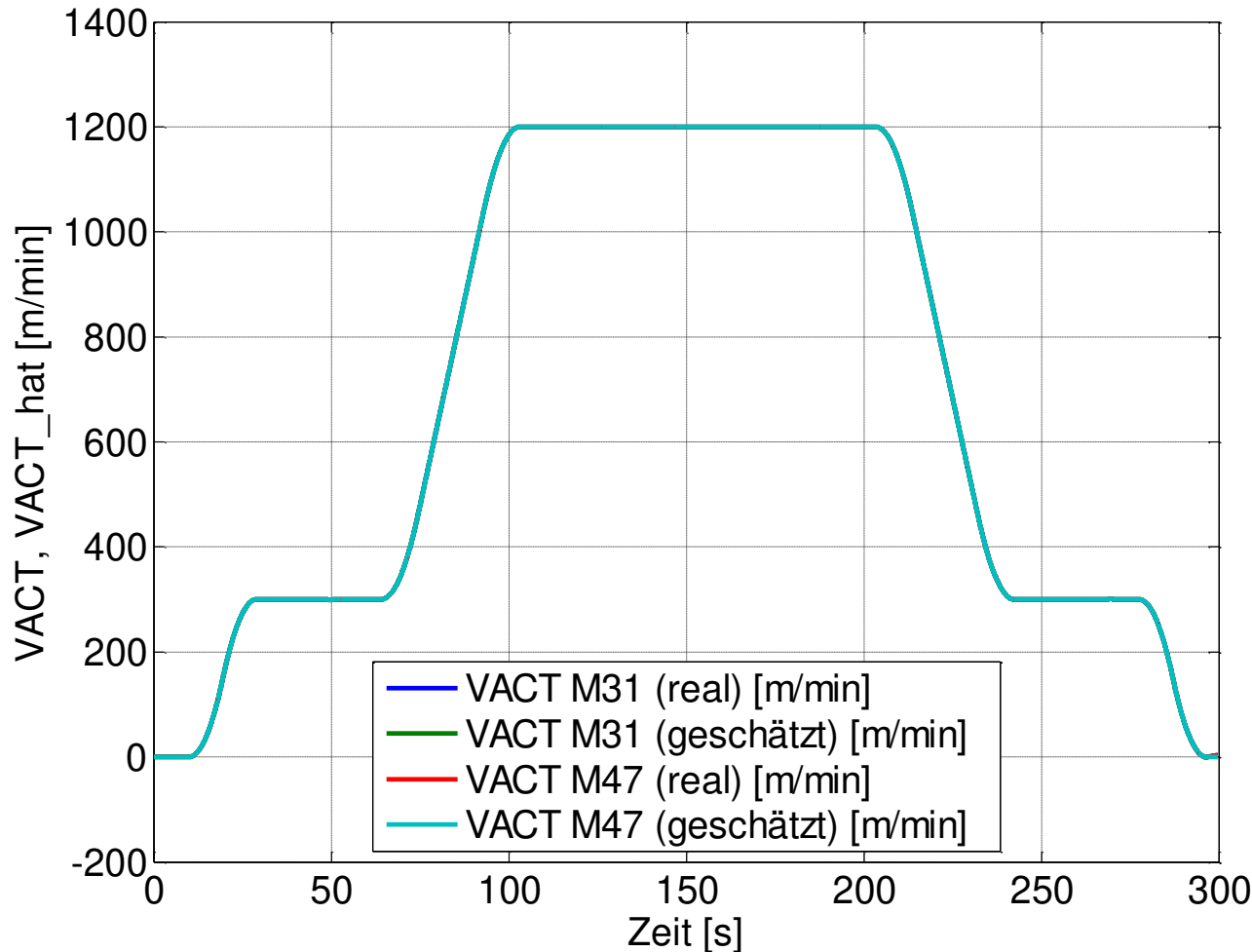
Rakelvorsteu-  
erung

Dezentrale  
Beobachter

Zusammen-  
fassung &  
Ausblick

# Dezentrale Störgrößenbeobachter

## Simulationsergebnisse – Beobachtung der Geschwindigkeit VACT [m/min]



Überblick &  
Forschungsziel

Anlage,  
Schnittstelle &  
Datensammlung

Modellierung  
und Analyse

Dezentrale  
Regelungs-  
konzepte

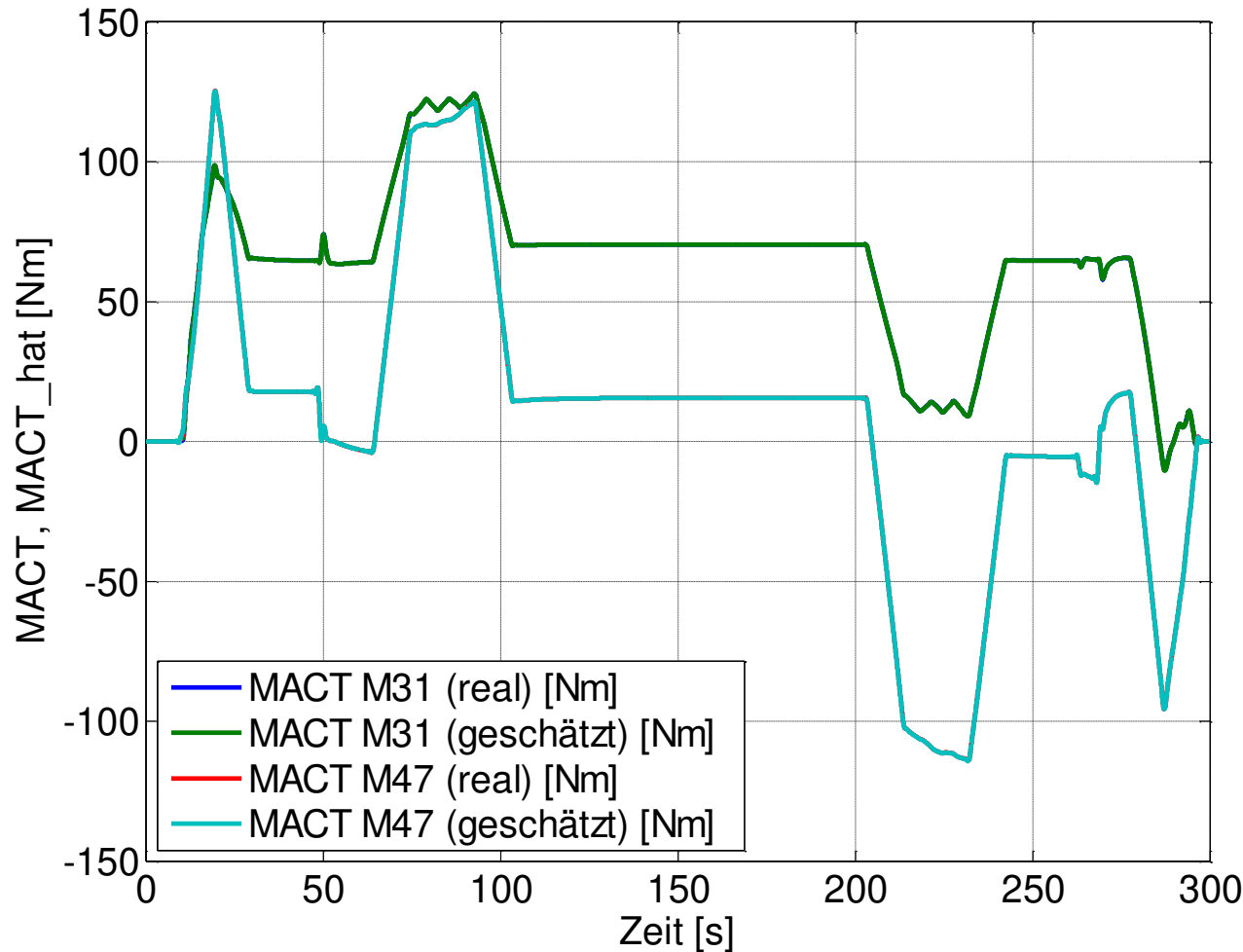
Rakelvorsteu-  
erung

Dezentrale  
Beobachter

Zusammen-  
fassung &  
Ausblick

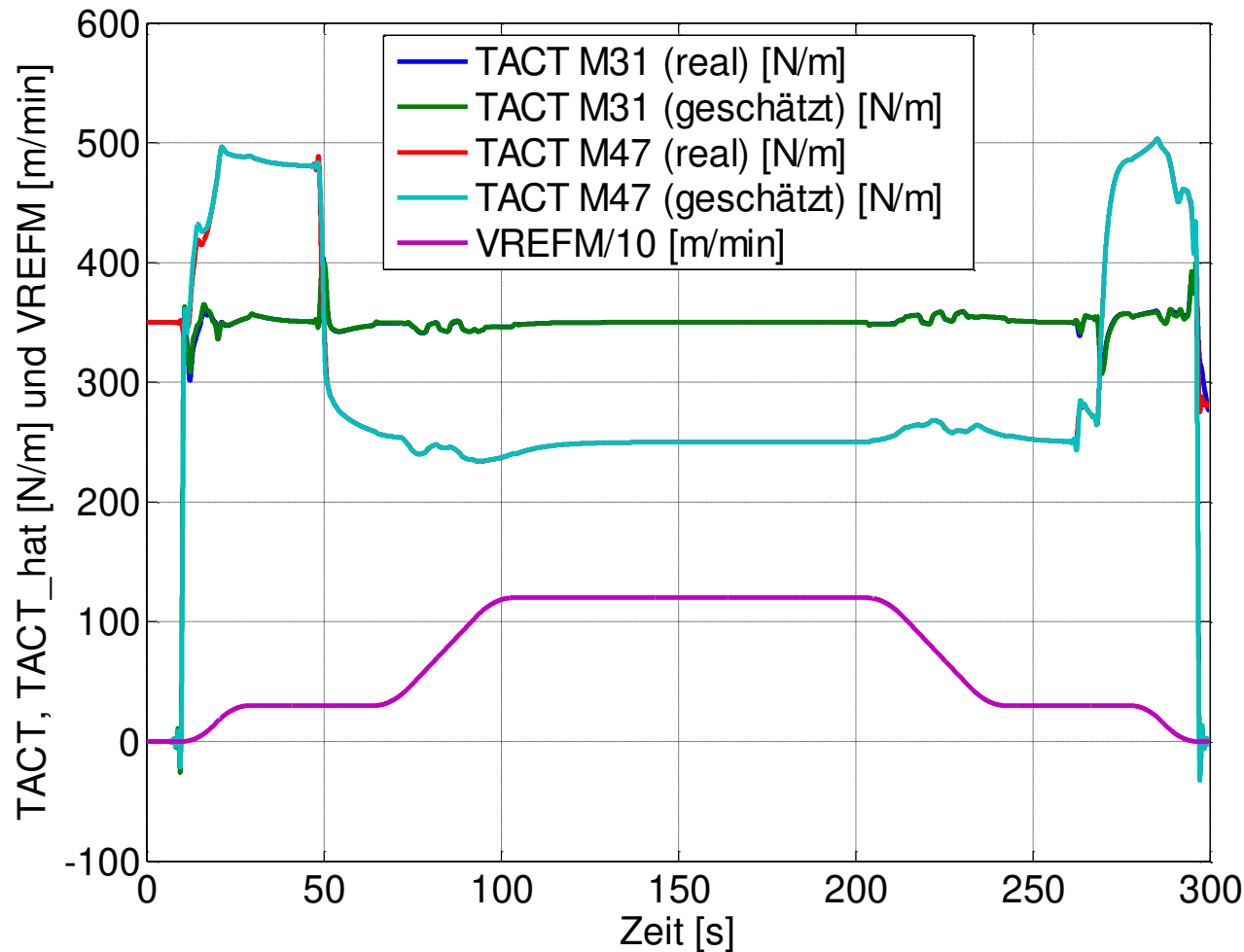
# Dezentrale Störgrößenbeobachter

## Simulationsergebnisse – Beobachtung des Motormomentes MACT [Nm]



# Dezentrale Störgrößenbeobachter

## Simulationsergebnisse – Beobachtung des Bahnzuges TACT [N/m]



Überblick &  
Forschungsziel

Anlage,  
Schnittstelle &  
Datensammlung

Modellierung  
und Analyse

Dezentrale  
Regelungs-  
konzepte

Rakelvorsteu-  
erung

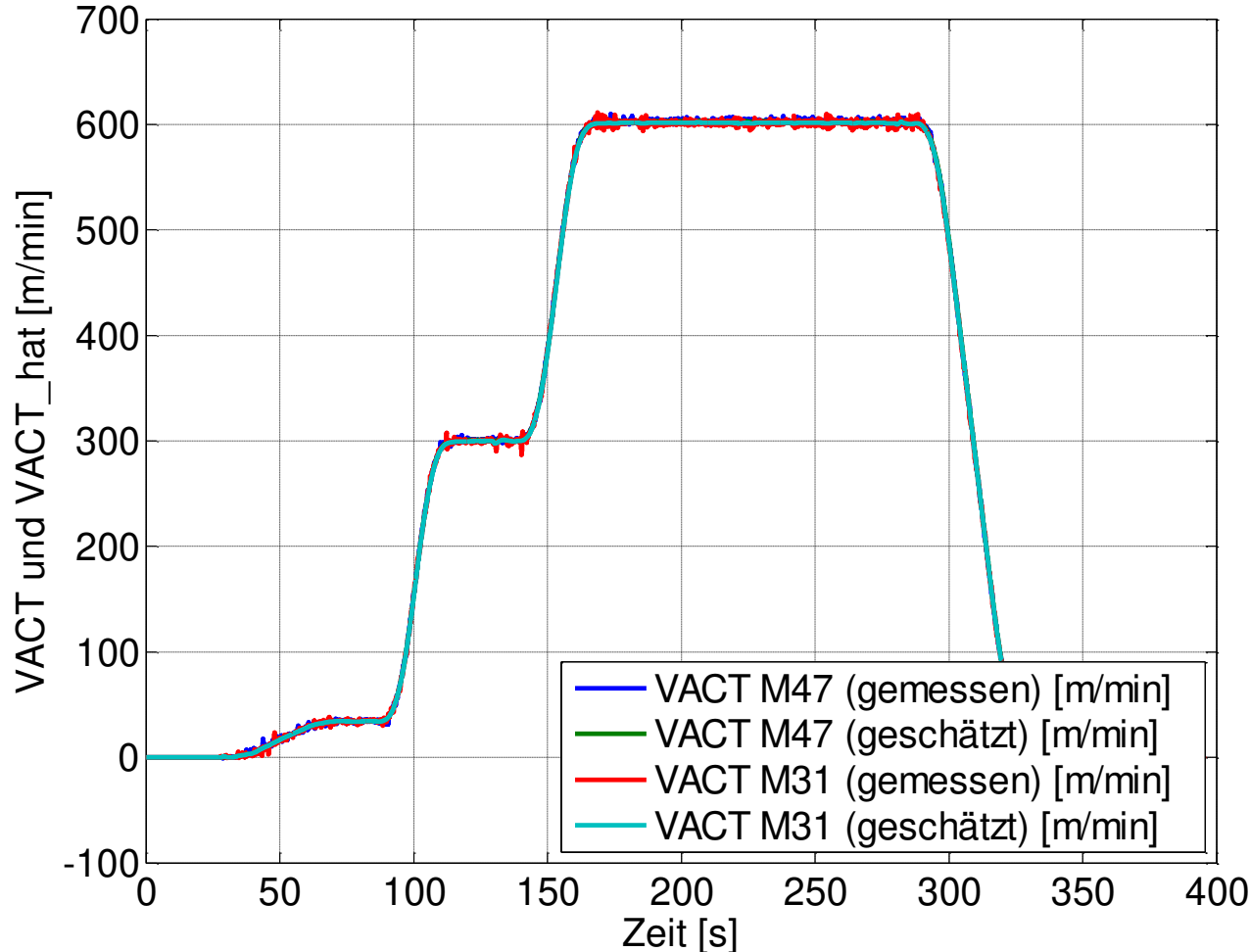
Dezentrale  
Beobachter

Zusammen-  
fassung &  
Ausblick

# Dezentrale Störgrößenbeobachter

## Messergebnisse – Beobachtung der Geschwindigkeit VACT [m/min]

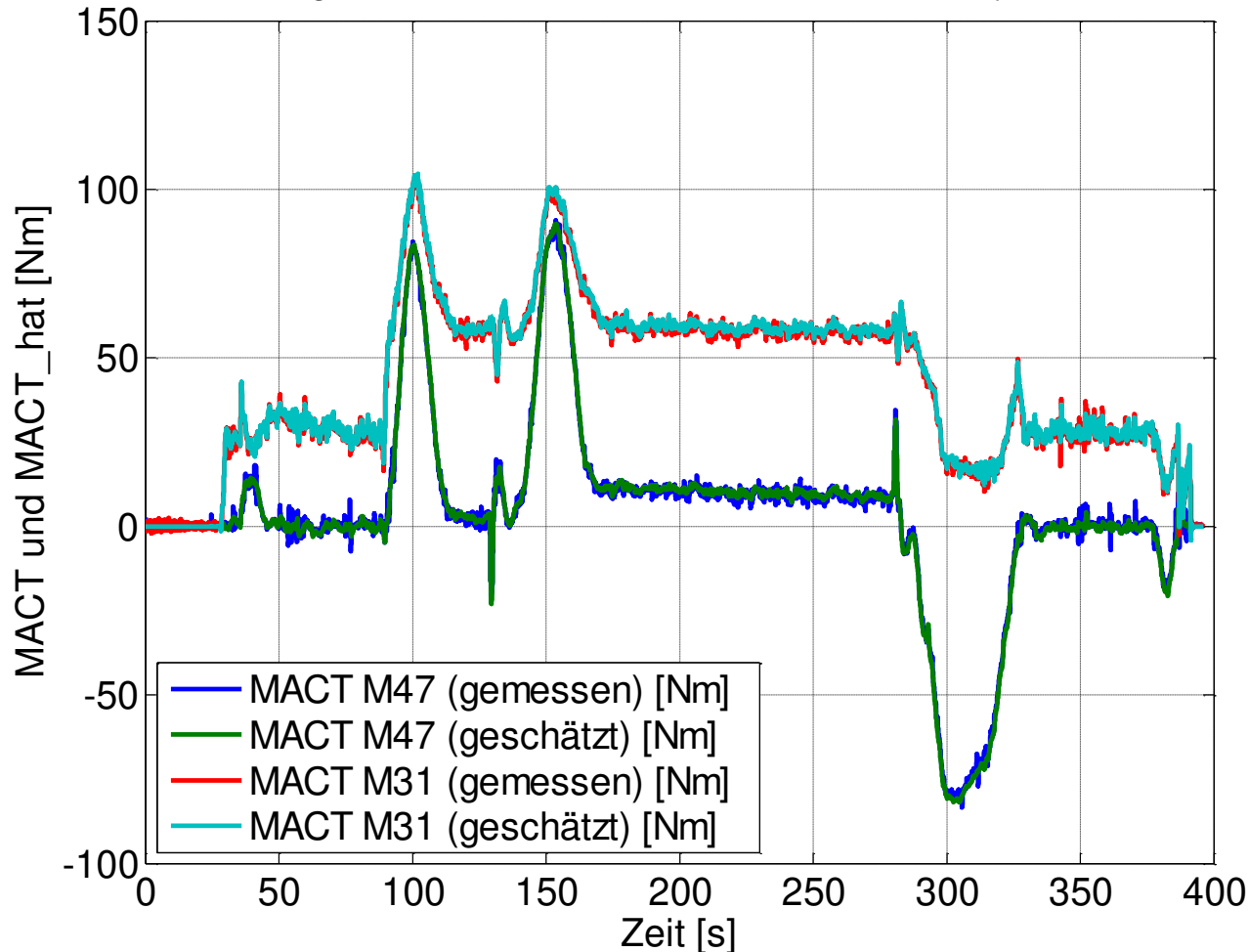
Dezentraler Störgrößenbeobachter dSPACE M47 & M31 (28.03.07 - III.D.3)



# Dezentrale Störgrößenbeobachter

## Messergebnisse – Beobachtung des Motormomentes MACT [Nm]

Dezentraler Störgrößenbeobachter dSPACE M47 & M31 (28.03.07 - III.D.3)



Überblick &  
Forschungsziel

Anlage,  
Schnittstelle &  
Datensammlung

Modellierung  
und Analyse

Dezentrale  
Regelungs-  
konzepte

Rakelvorsteu-  
erung

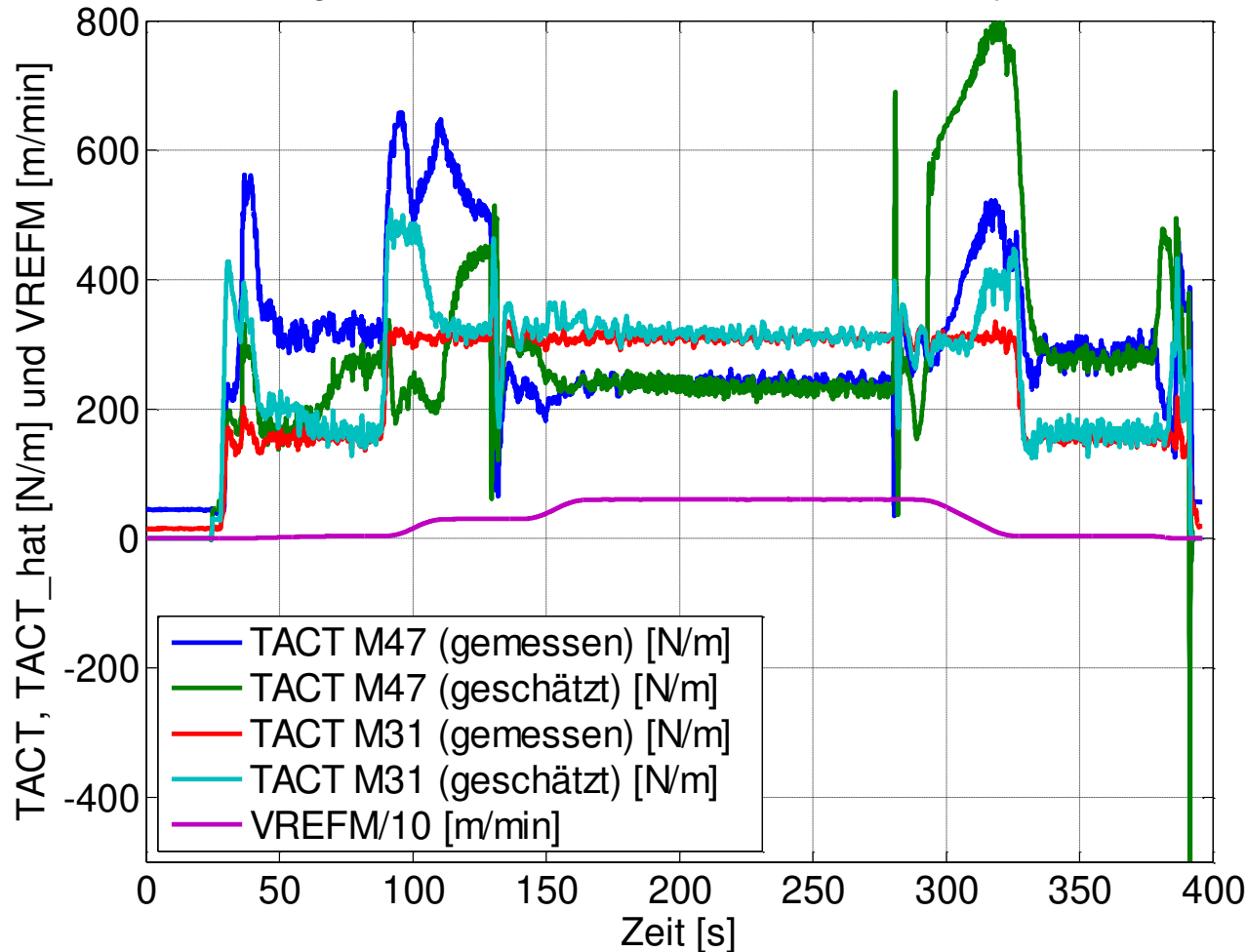
Dezentrale  
Beobachter

Zusammen-  
fassung &  
Ausblick

# Dezentrale Störgrößenbeobachter

## Messergebnisse – Beobachtung des Bahnzuges TACT [N/m]

Dezentraler Störgrößenbeobachter dSPACE M47 & M31 (28.03.07 - III.D.3)



Überblick &  
Forschungsziel

Anlage,  
Schnittstelle &  
Datensammlung

Modellierung  
und Analyse

Dezentrale  
Regelungs-  
konzepte

Rakelvorsteu-  
erung

Dezentrale  
Beobachter

Zusammen-  
fassung &  
Ausblick

# Zusammenfassung & Ausblick

1. **Verbesserte Regelgüte & Entkopplung (M31)**
2. **Rakelvorsteuerung minimiert Bahnzugeinbruch (M47)**
3. **Ausführliche Simulations- & Messergebnisse**
4. **Schnittstelle dSPACE – S5 erweiterbar (z.B. Regelung der Abrollung)**
5. **Dezentrale Beobachter erlauben zusätzliche Überwachung der Anlage (momentan während des stationären Verhaltens)**
6. **Modulare Simulationsbausteine (HLG, Klemmstellen mit/ohne elastischem ZMS, Regler, Vorsteuerung)**
7. **Simulationsaufbauten beliebiger Anlagen (z.B. Folienindustrie) möglich**