

„Optimale Bahnspannungsregelung am Beispiel einer Papierstreichanlage“

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



Überblick &
Forschungsziel

Anlage,
Komponenten &
Datensammlung

Modellierung
und Analyse

Schnittstelle

Dezentrale
Entkopplung

Rakelvorsteu-
erung

Zusammen-
fassung &
Ausblick

Gliederung

1. **Überblick & Forschungsziel**
2. **VESTRA Anlage, Identifikation relevanter Anlagenkomponenten und Datensammlung**
3. **Systemmodellierung und – Analyse**
4. **Schnittstelle zwischen VESTRA und dSPACE Testrechner**
5. **Dezentrale Entkopplung (Messergebnisse und Vergleich)**
6. **Rakelvorsteuerung (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)

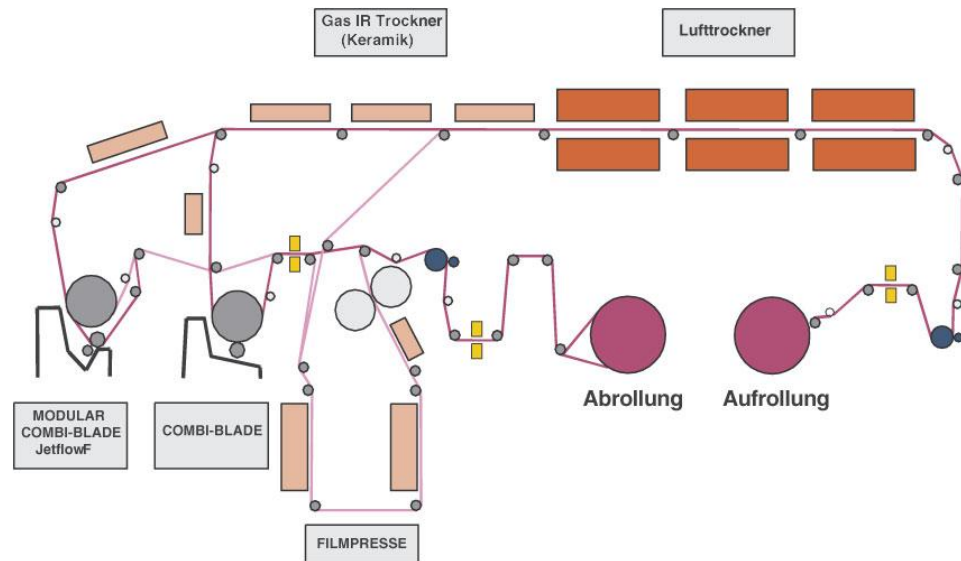


Abb. 2: Übersicht des Streichprozesses (Bahnlauf der VESTRA)

Forschungsziel:

Optimierung der Bahnzugregelung

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

Identifikation relevanter Anlagenkomponenten

Überblick &
Forschungsziel

Anlage,
Komponenten &
Datensammlung

Modellierung
und Analyse

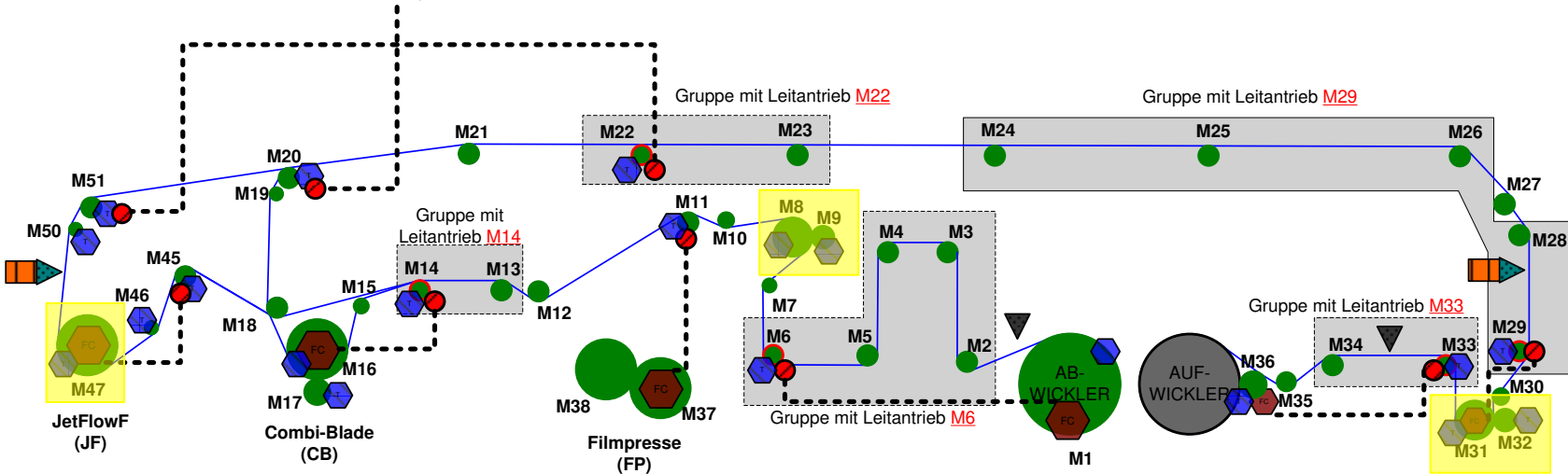
Schnittstelle

Dezentrale
Entkopplung

Rakelvorsteu-
erung

Zusammen-
fassung &
Ausblick

Nur Anzeige (Automation-X)



Regelungsart:

Drehzahlregelung (NC) des Antriebs:

- Antriebe mit Drehzahlsensor => VC (Vector Control)
- Antriebe ohne Drehzahlsensor => FC (Frequency Control)

● **Zug- bzw. Kraftregelung (FC)**
des Antriebs

Sensorart:

- Zugmessdose (Messwalze für Bahnspannung/Kraft): **ABB PFTL 101A 0,5kN** mit Control Unit **ABB PFTA 101A**
- DigitalTacho (Messwalze für Geschwindigkeit): **Hübner HOG 10 D1024**
- 2x Temperatur- und Feuchtigkeitsmessung
- Feuchtigkeitsmessung: **Honeywell Infrarot-Transmissionssensor Typ 4205-1 Precision Infrared Moisture Measurement (Standard Power)**

Anmerkung:

- 1.) Gruppe bedeutet alle Antriebe einer Gruppe hängen parallel an selben Umrichter mit gleichem Sollwert wie Leitantrieb
- 2.) Zug- bzw. Kraftregelung + Sensorverknüpfung sind eingezeichnet über gestrichelte Linie - - - - -

Für Simulation 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 der installierten Regelung**
- ⇒ **Grundvoraussetzung für folgende Entwicklungsschritte (ohne dabei den Betrieb der VESTRA stark einzuschränken)**

Überblick &
Forschungsziel

Anlage,
Komponenten &
Datensammlung

Modellierung
und Analyse

Schnittstelle

Dezentrale
Entkopplung

Rakelvorsteu-
erung

Zusammen-
fassung &
Ausblick

Systemmodellierung und –Analyse:

1.) Elastisches Zwei-Massen-System

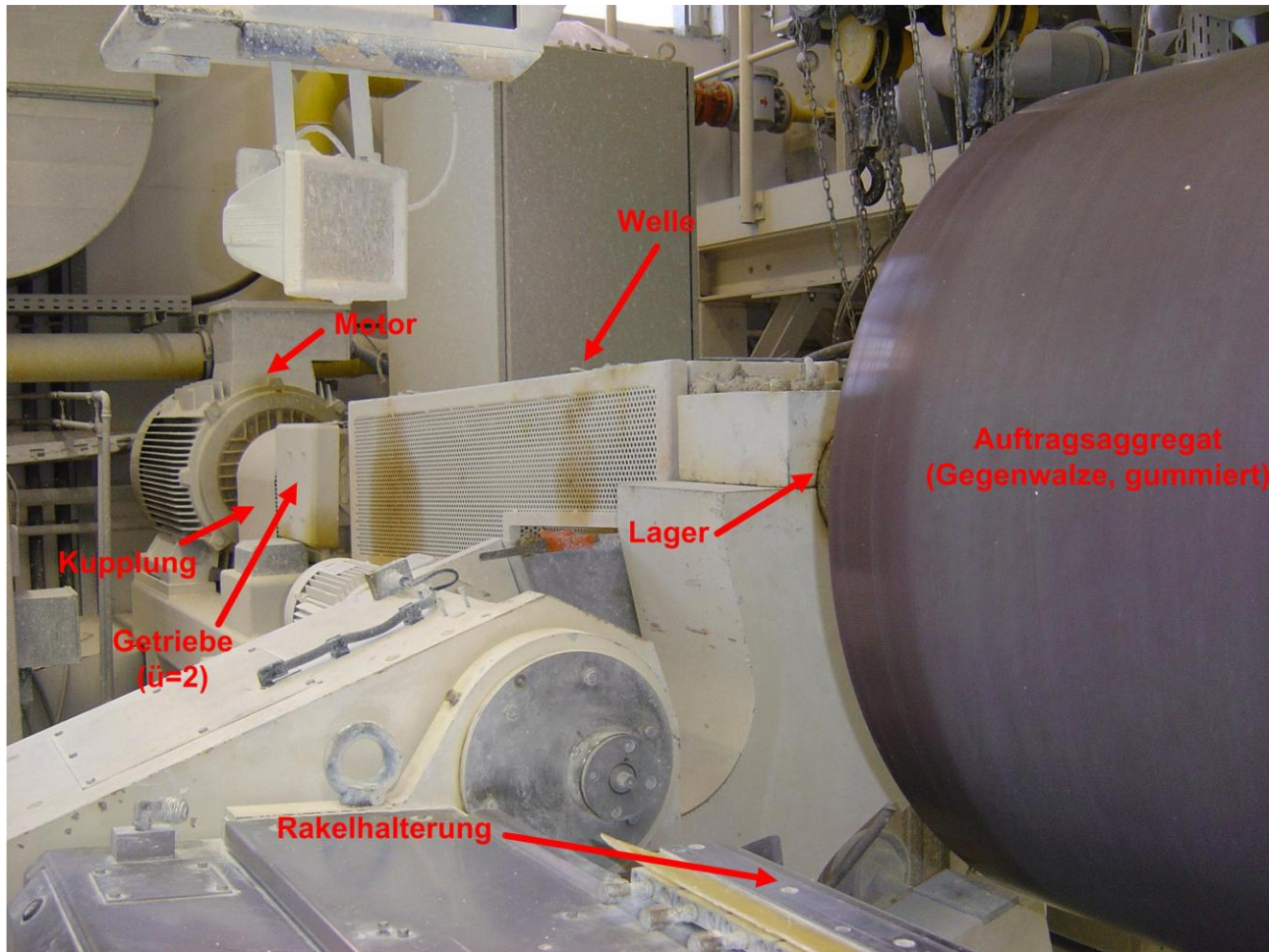


Abb. 3: Antriebssystem M47 (Auftragsaggregat JetflowF) zwischen Motor und Walze (elastische Welle, Lose & Reibung)

Systemmodellierung und –Analyse:

1.) Elastisches Zwei-Massen-System

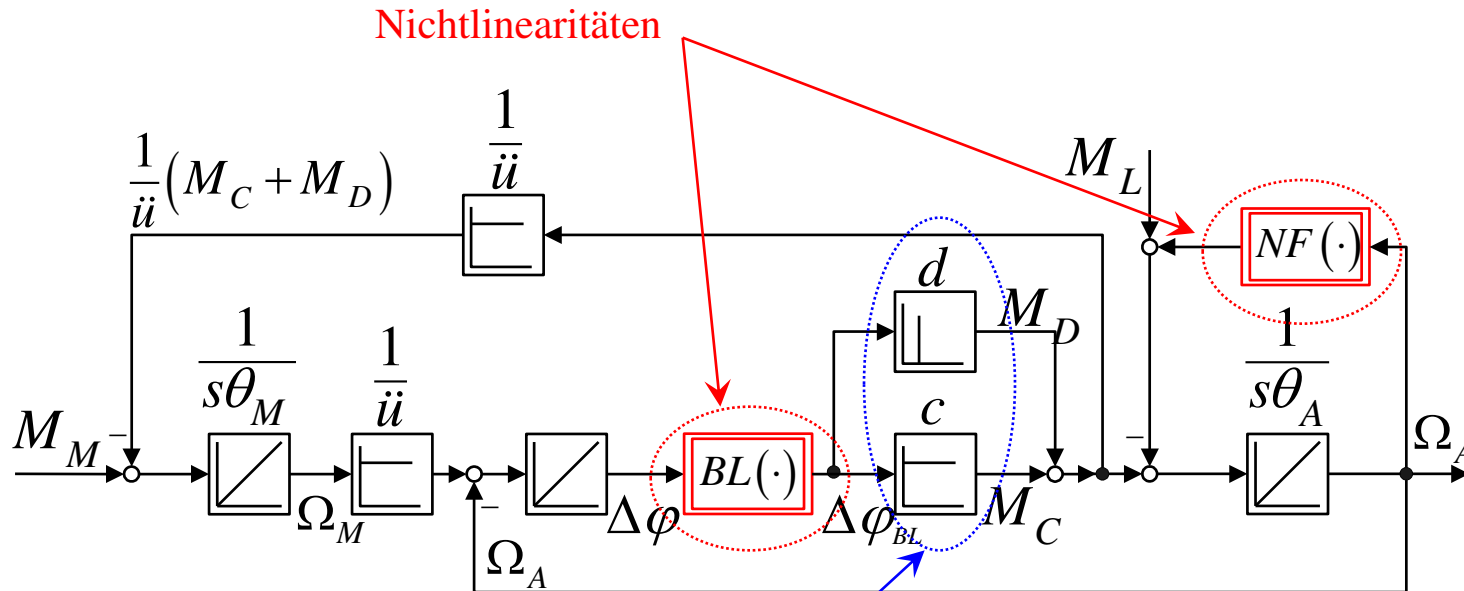


Abb. 4: Elastisches Zwei-Massen-System zwischen Motor und Walze (Welle, Lose BL & Reibung NF)

Parameterunsicherheiten

Systemmodellierung und –Analyse:

2.) Teilsystem #i (Klemmstelle)

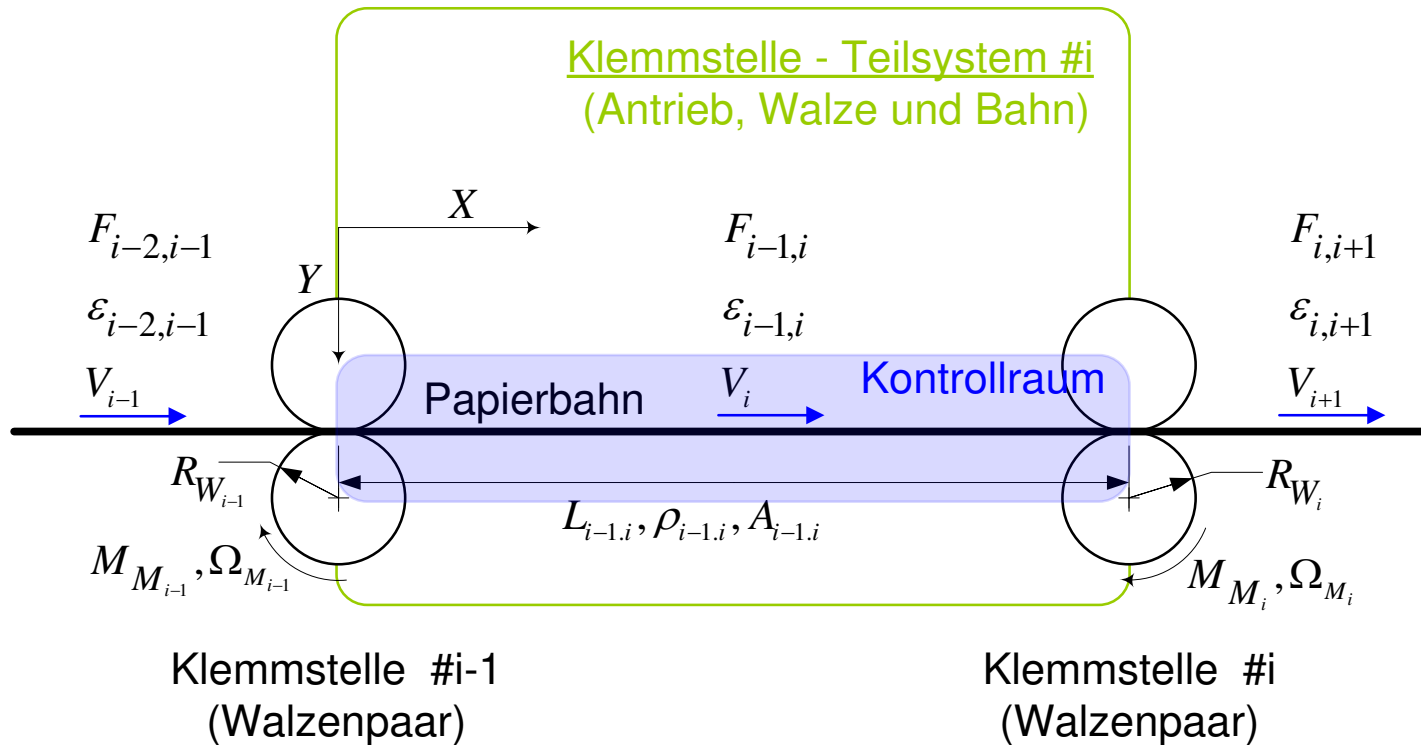


Abb. 5: Definition eines Teilsystems #i (Klemm- bzw. Umschlingungswalze bei Haftung)

Systemmodellierung und –Analyse:

2.) Teilsystem #i (Klemmstelle)

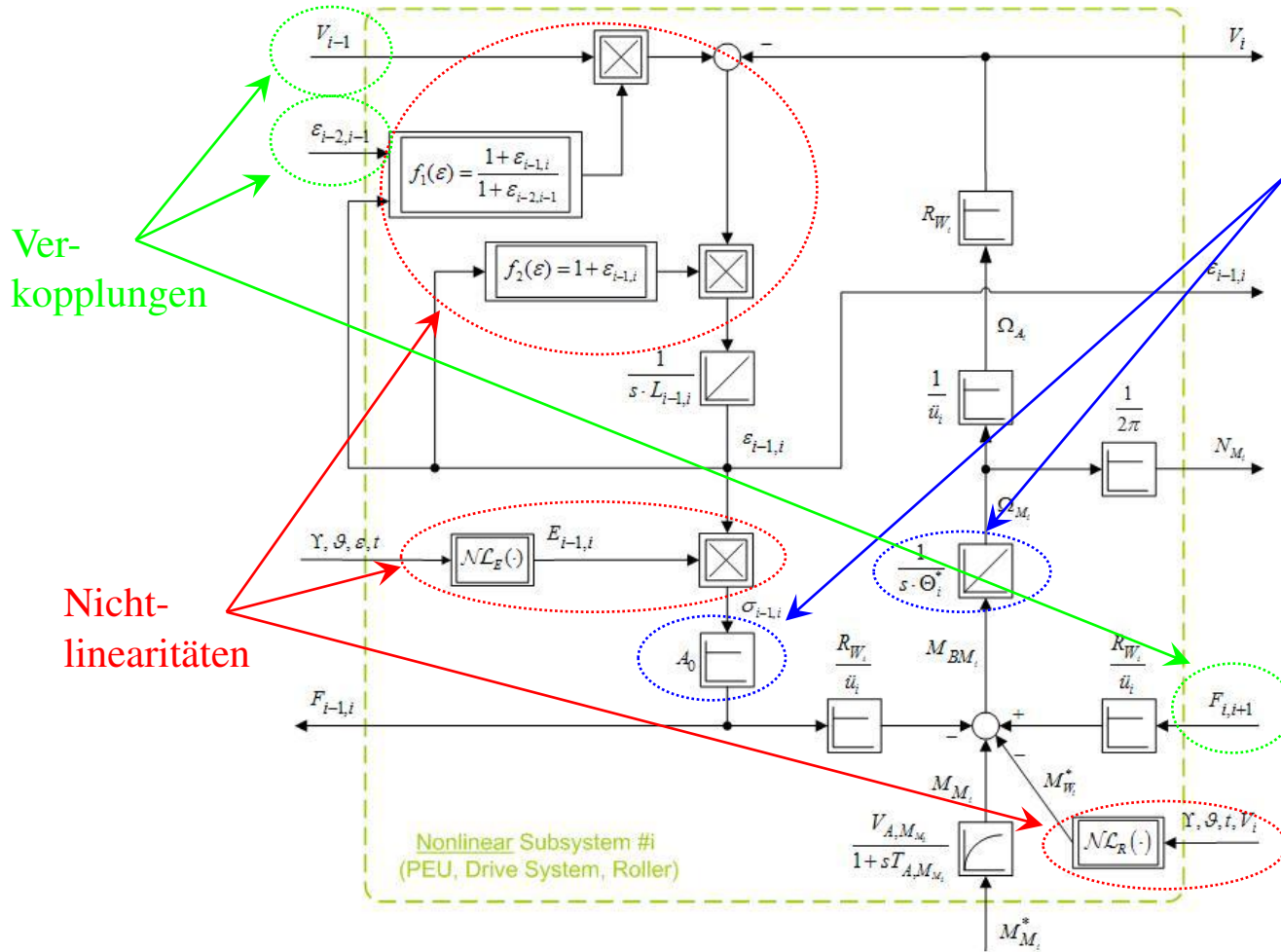


Abb. 6: Nichtlineares Blockdiagramm des Teilsystems #i (Klemm- bzw. Umschlingungswalze bei Haftung)

Systemmodellierung und –Analyse:

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

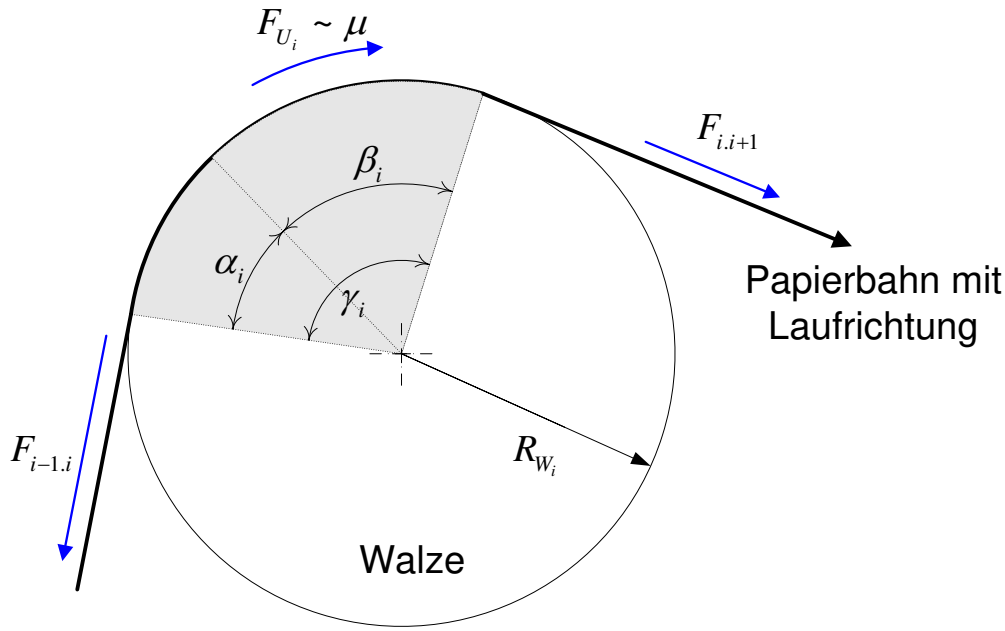


Abb. 7: Umschlungene Walze des Teilsystems #i mit Haft- und Gleitzzone

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 und –Analyse:

4.) Querkräfte (Haftung oder Versatz)

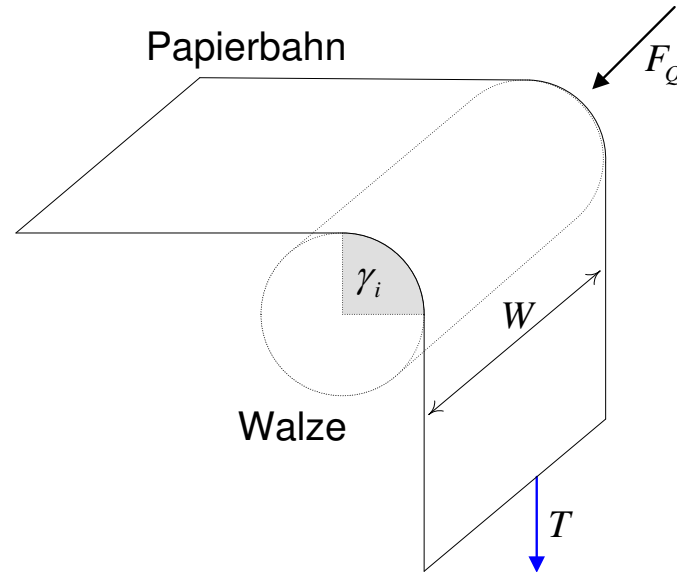


Abb. 8: Umschlungene Walze des Teilsystems #i bei Querkräften mit Bahnbreite W [m] und Bahnzug T [N/m]

Versatzbedingung
bei Querkräften:

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

Systemmodellierung und –Analyse:

VESTRA Anlage als MATLAB/SIMULINK Block (JetFlowF)

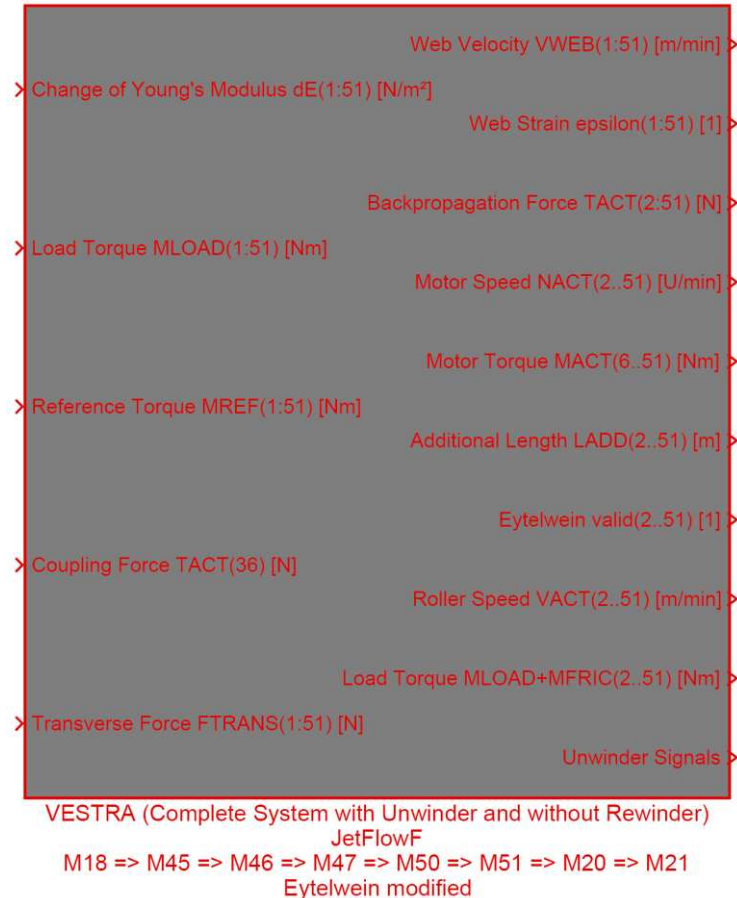


Abb. 10a: Simulationsbaustein für gesamte VESTRA Anlage bei Betrieb mit JetFlowF

Systemmodellierung und –Analyse:

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

Schnittstelle zwischen dSPACE und S5

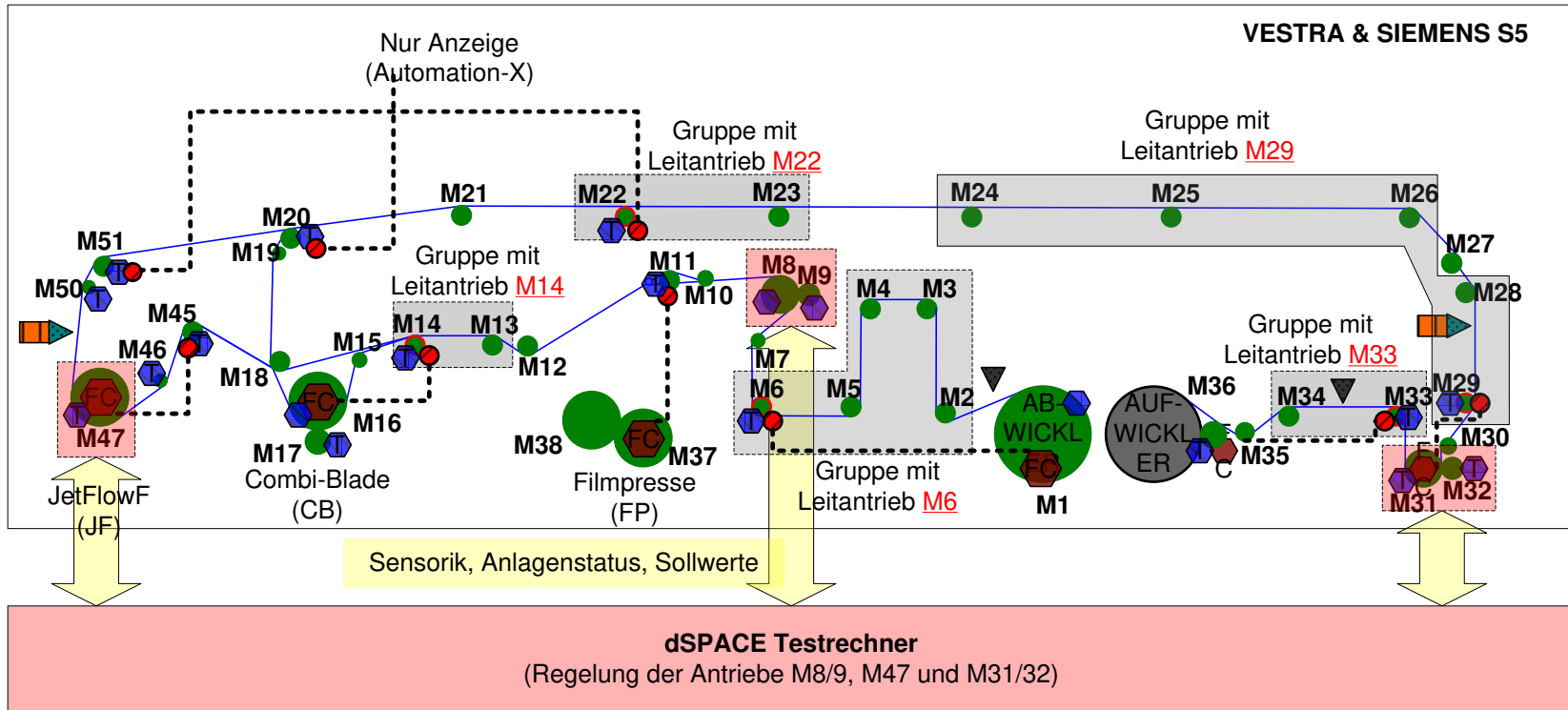


Abb. 19: Schnittstelle zur Regelung der VESTRA mit S5 und dSPACE Testrechner (Betriebsart JetflowF)

Überblick & Forschungsziel

Anlage, Komponenten & Datensammlung

Modellierung und Analyse

Schnittstelle

Dezentrale Entkopplung

Rakelvorsteuerung

Zusammenfassung & Ausblick

Dezentrale Regelungskonzepte

Aufbau und Funktionsprinzip

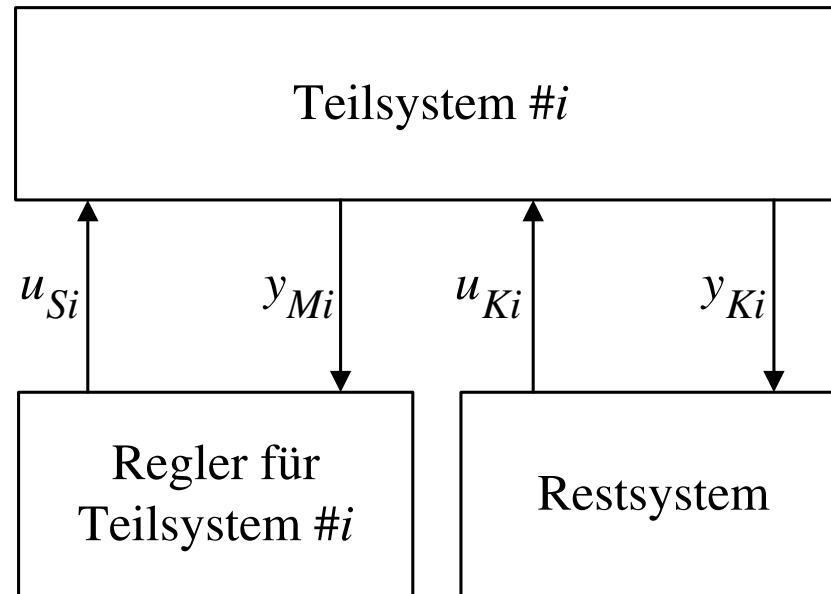


Abb. 11: Blockdiagramm zur dezentralen Regelung eines Teilsystems #i bei Verkopplung mit Restsystem

Momentane PI-Kaskaden-Regelung

Empirische Auslegung (ohne Minimierung der Koppeleinflüsse)

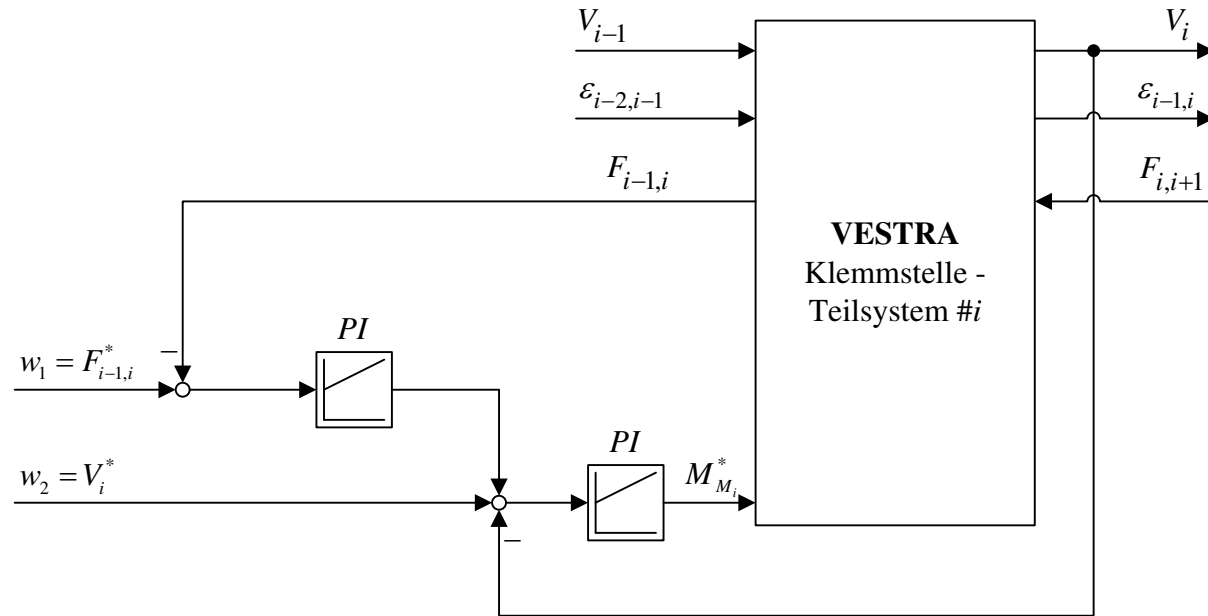


Abb. 11: Blockdiagramm der PI-Kaskadenregelung für Bahngeschwindigkeit und Bahnzug des Teilsystems #i

Dezentrale Entkopplung

Optimierte Zustandsregelung zur Minimierung der Koppeleinflüsse (Dezentraler Entwurf)

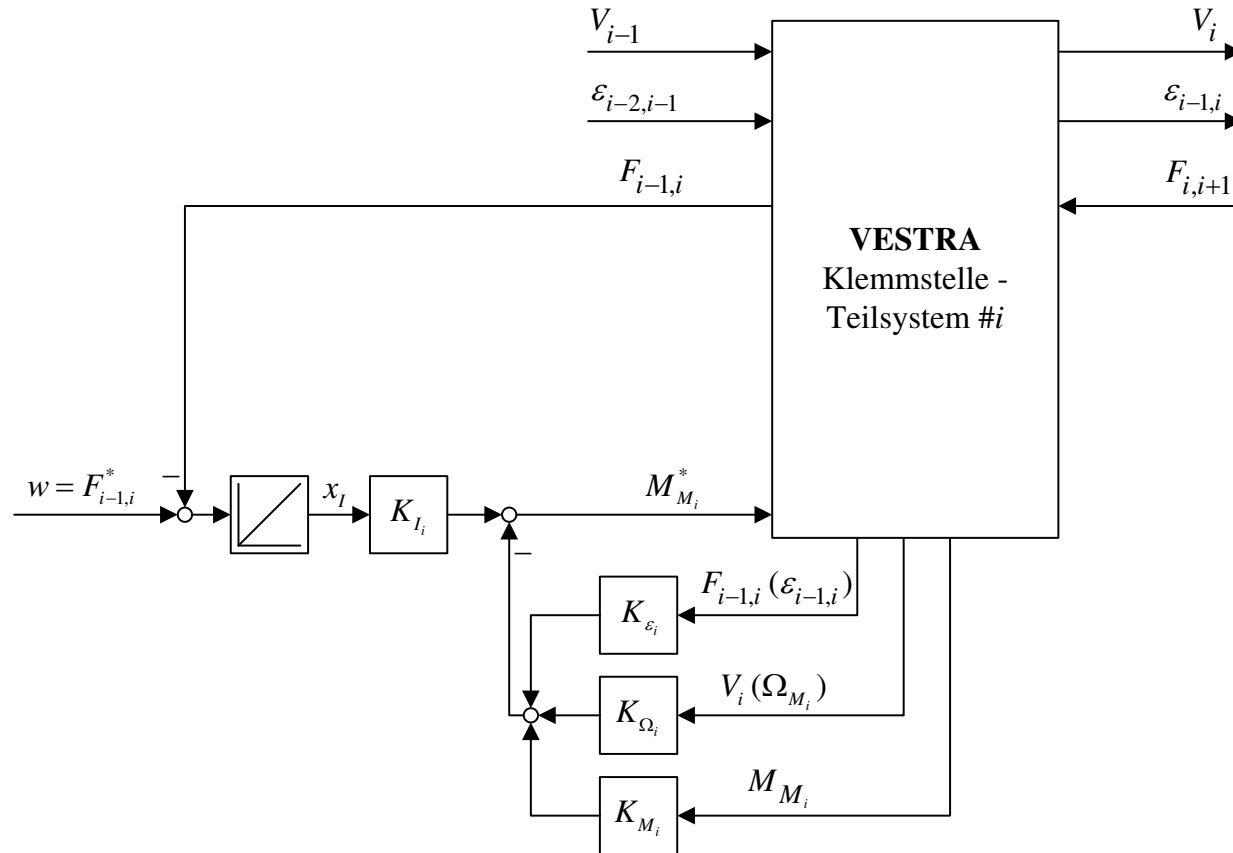


Abb. 13: Blockdiagramm der Dezentralen Entkopplung (optimierte Zustandsregelung) mit Führungsintegrator am Teilsystem #i (Dezentraler Entwurf)

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 (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 (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 (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 (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 (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, Komponenten & Datensammlung

Modellierung und Analyse

Schnittstelle

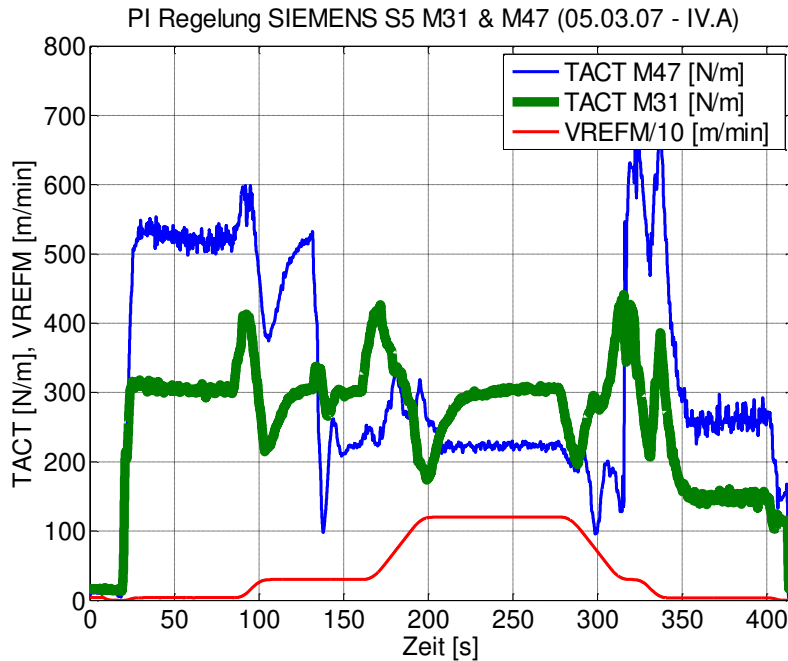
Dezentrale Entkopplung

Rakelvorsteuerung

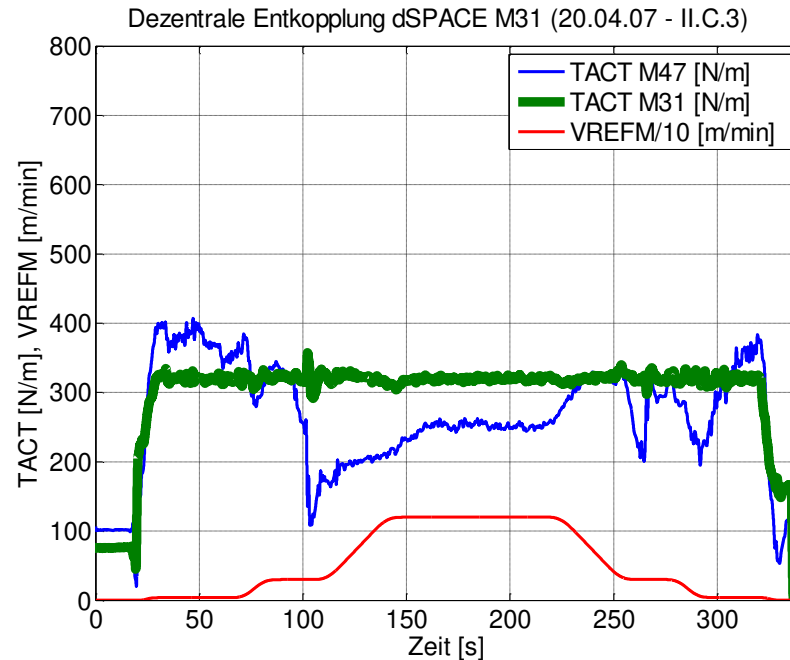
Zusammenfassung & Ausblick

Vergleich PI-Regelung & Dezentrale Entkopplung

Ausgewählte Messergebnisse: Q10 – Vergleich



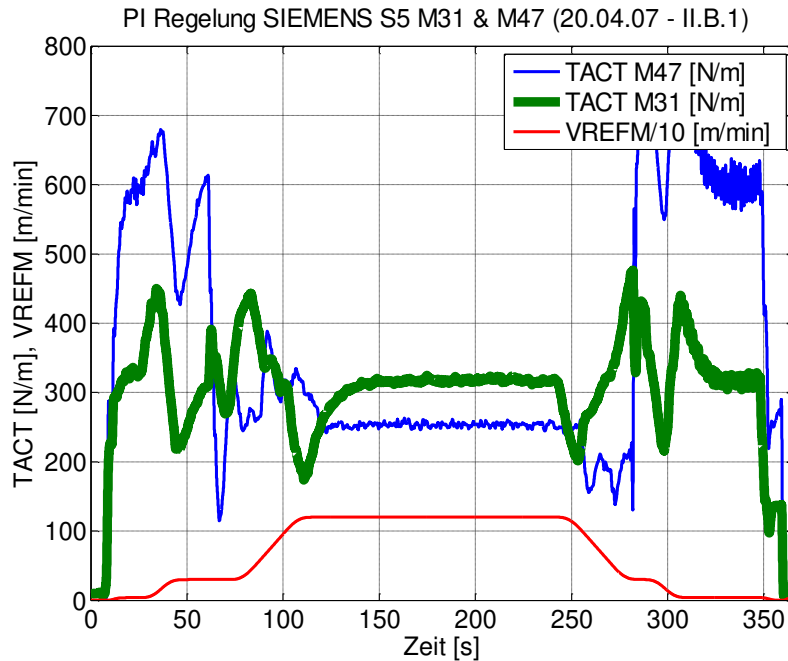
PI-Kaskade (S5)



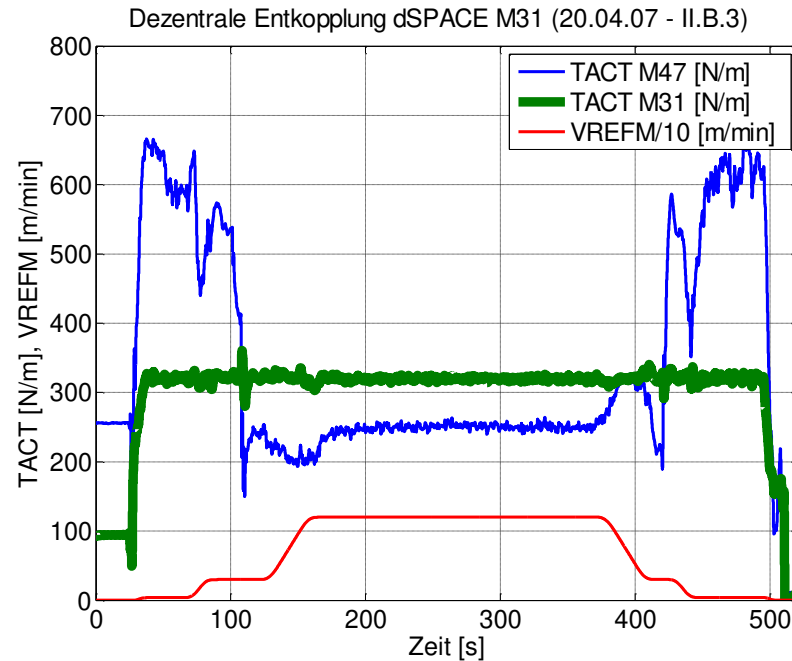
Dezentrale Entkopplung (dSPACE)

Vergleich PI-Regelung & Dezentrale Entkopplung

Ausgewählte Messergebnisse: Q20 – Vergleich



PI-Kaskade (S5)



Dezentrale Entkopplung (dSPACE)

Überblick &
Forschungsziel

Anlage,
Komponenten &
Datensammlung

Modellierung
und Analyse

Schnittstelle

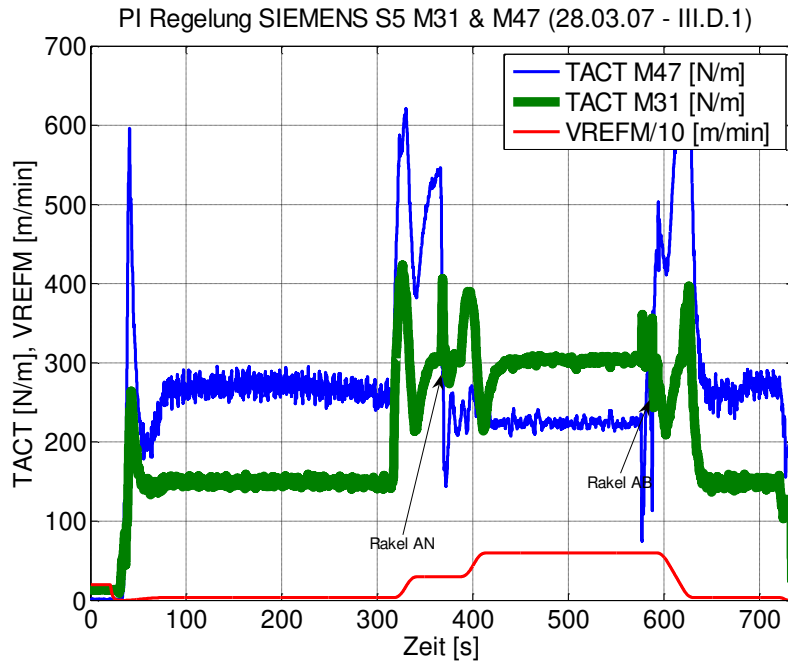
Dezentrale
Entkopplung

Rakelvorsteu-
erung

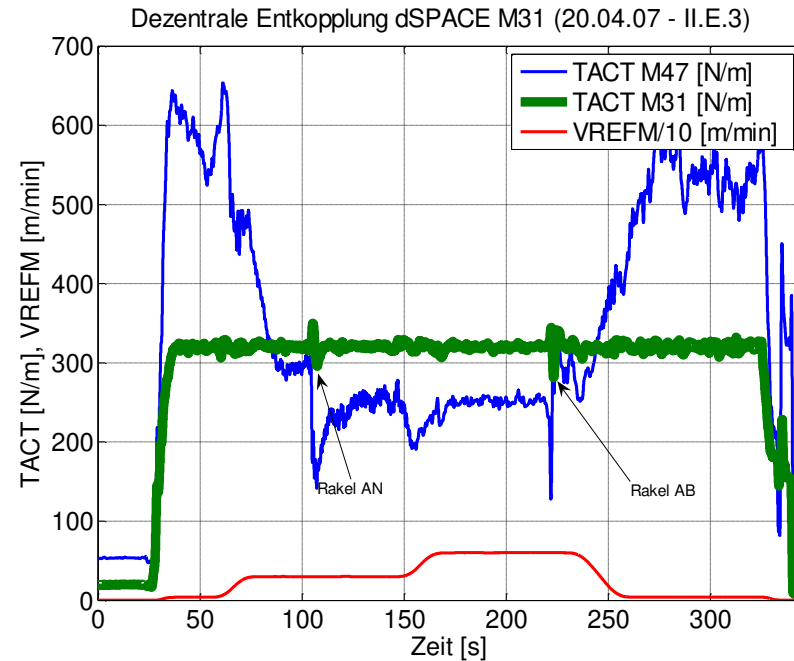
Zusammen-
fassung &
Ausblick

Vergleich PI-Regelung & Dezentrale Entkopplung

Ausgewählte Messergebnisse: Q40 – Vergleich



PI-Kaskade (S5)



Dezentrale Entkopplung (dSPACE)

Überblick &
Forschungsziel

Anlage,
Komponenten &
Datensammlung

Modellierung
und Analyse

Schnittstelle

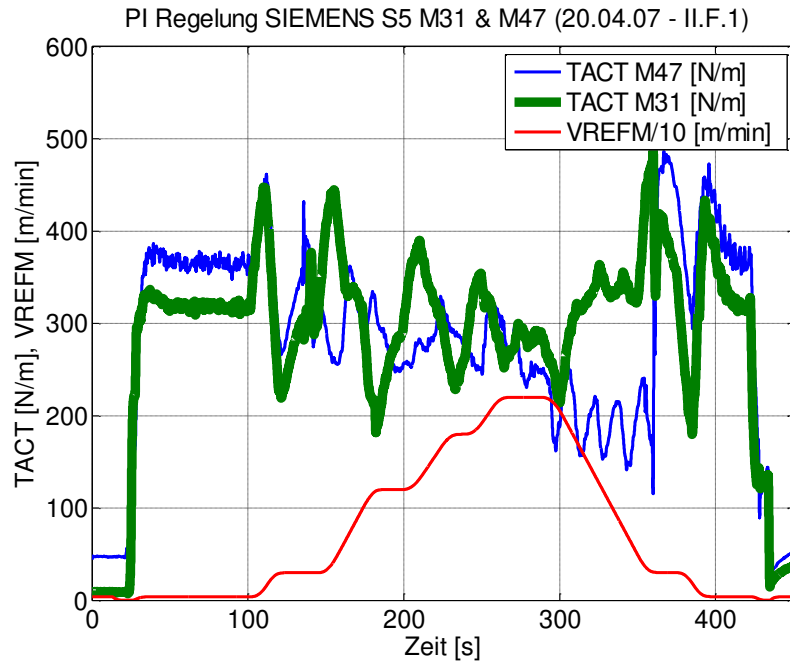
Dezentrale
Entkopplung

Rakelvorsteu-
erung

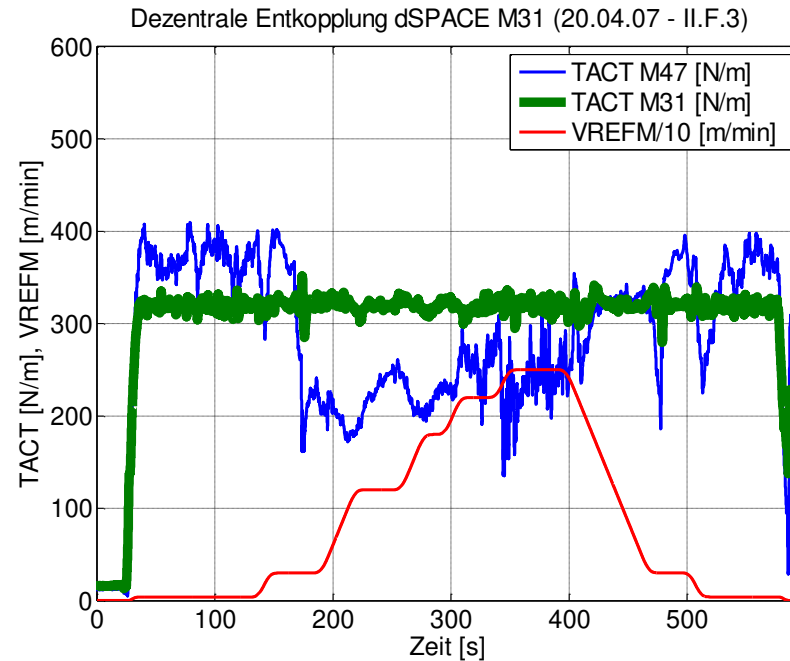
Zusammen-
fassung &
Ausblick

Vergleich PI-Regelung & Dezentrale Entkopplung

Ausgewählte Messergebnisse: Q20 – Vergleich (Maximale Geschwindigkeit)



PI-Kaskade (S5)



Dezentrale Entkopplung (dSPACE)

Rakelvorsteuerung (Störgrößenaufschaltung)

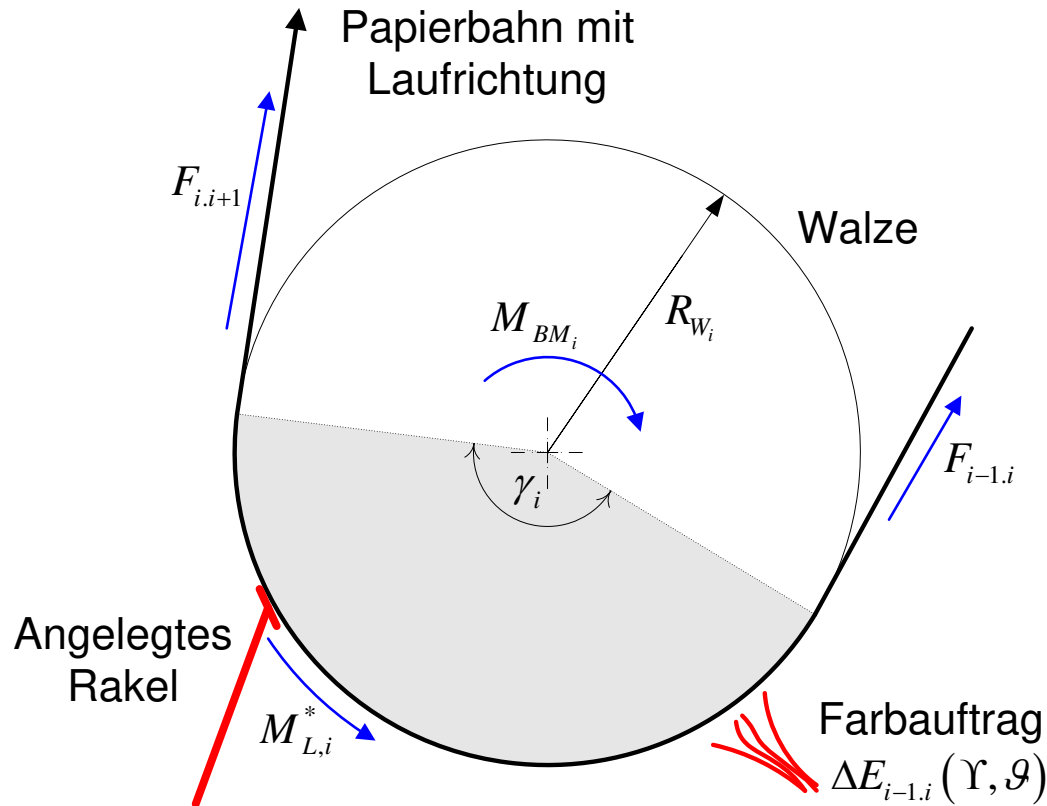


Abb. 17: Auftragsaggregat M47 (JetflowF) beim Anlegen des Rakels (Lastmoment) und Beginn des Farbauftrages (E-Moduländerung)

Überblick & Forschungsziel

Anlage, Komponenten & Datensammlung

Modellierung und Analyse

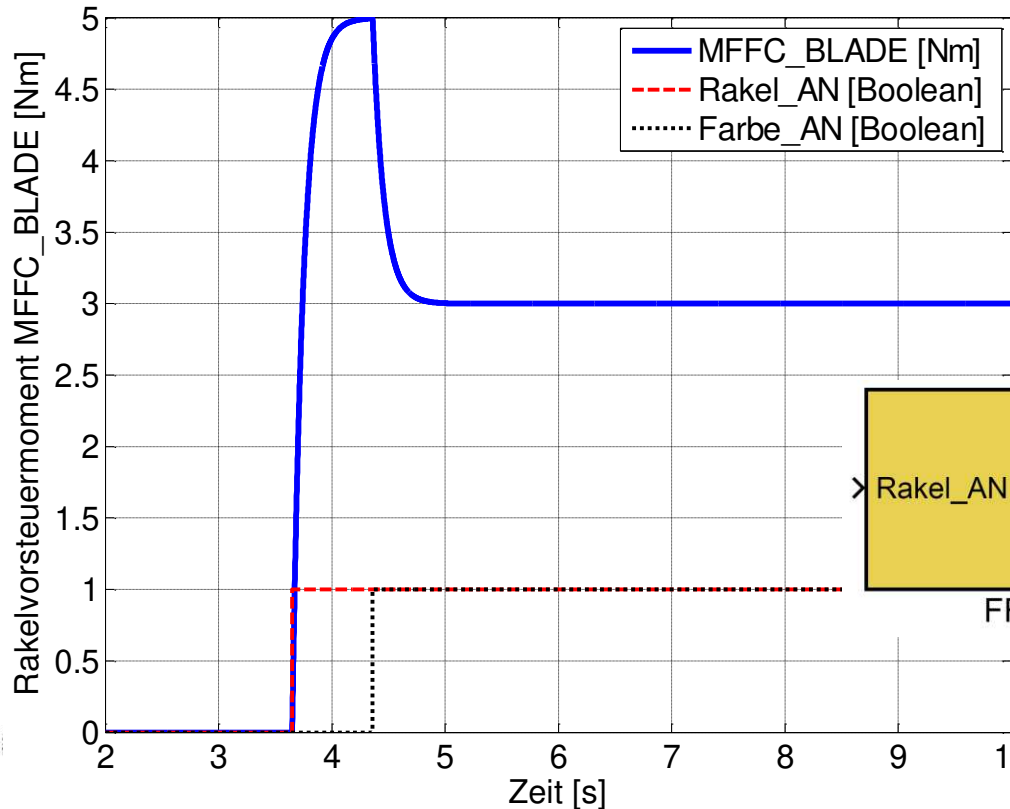
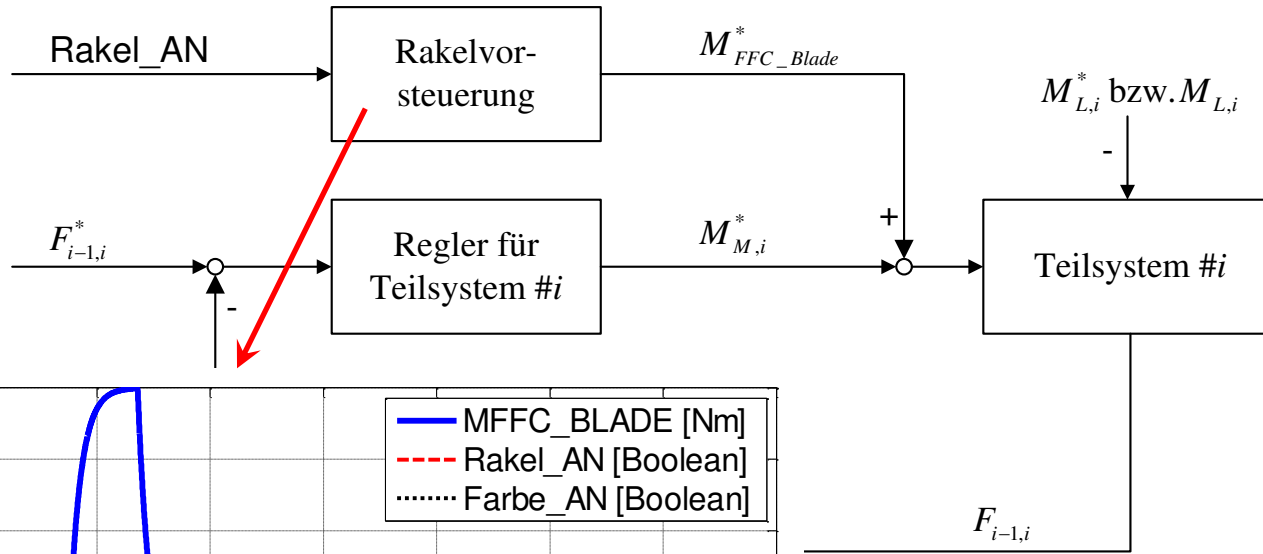
Schnittstelle

Dezentrale Entkopplung

Rakelvorsteuerung

Zusammenfassung & Ausblick

Rakelvorsteuerung (Störgrößenaufschaltung)



vom implementierten Regler wird ein
gt



FFC for Load Torque (Blade)

Überblick &
Forschungsziel

Anlage,
Komponenten &
Datensammlung

Modellierung
und Analyse

Schnittstelle

Dezentrale
Entkopplung

Rakelvorsteu-
erung

Zusammen-
fassung &
Ausblick

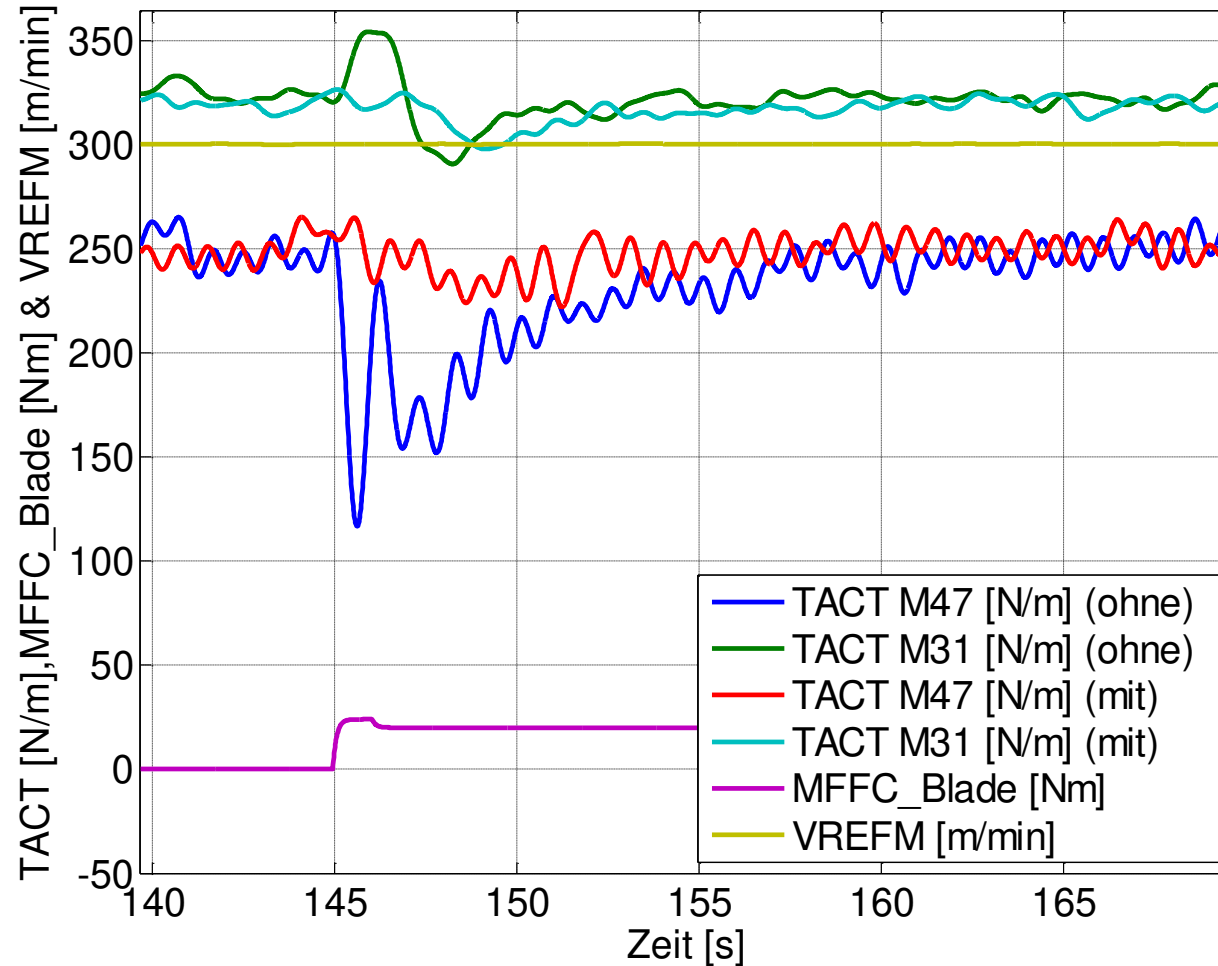
Technische Universität München (TUM)

oh.hackl@tum.de

Erweiterung: Rakelvorsteuerung (Störgrößenaufschaltung)

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

Rakelvorsteuerung VESTRA Stiffblade (20.04.07 - I.A.)



Überblick &
Forschungsziel

Anlage,
Komponenten &
Datensammlung

Modellierung
und Analyse

Schnittstelle

Dezentrale
Entkopplung

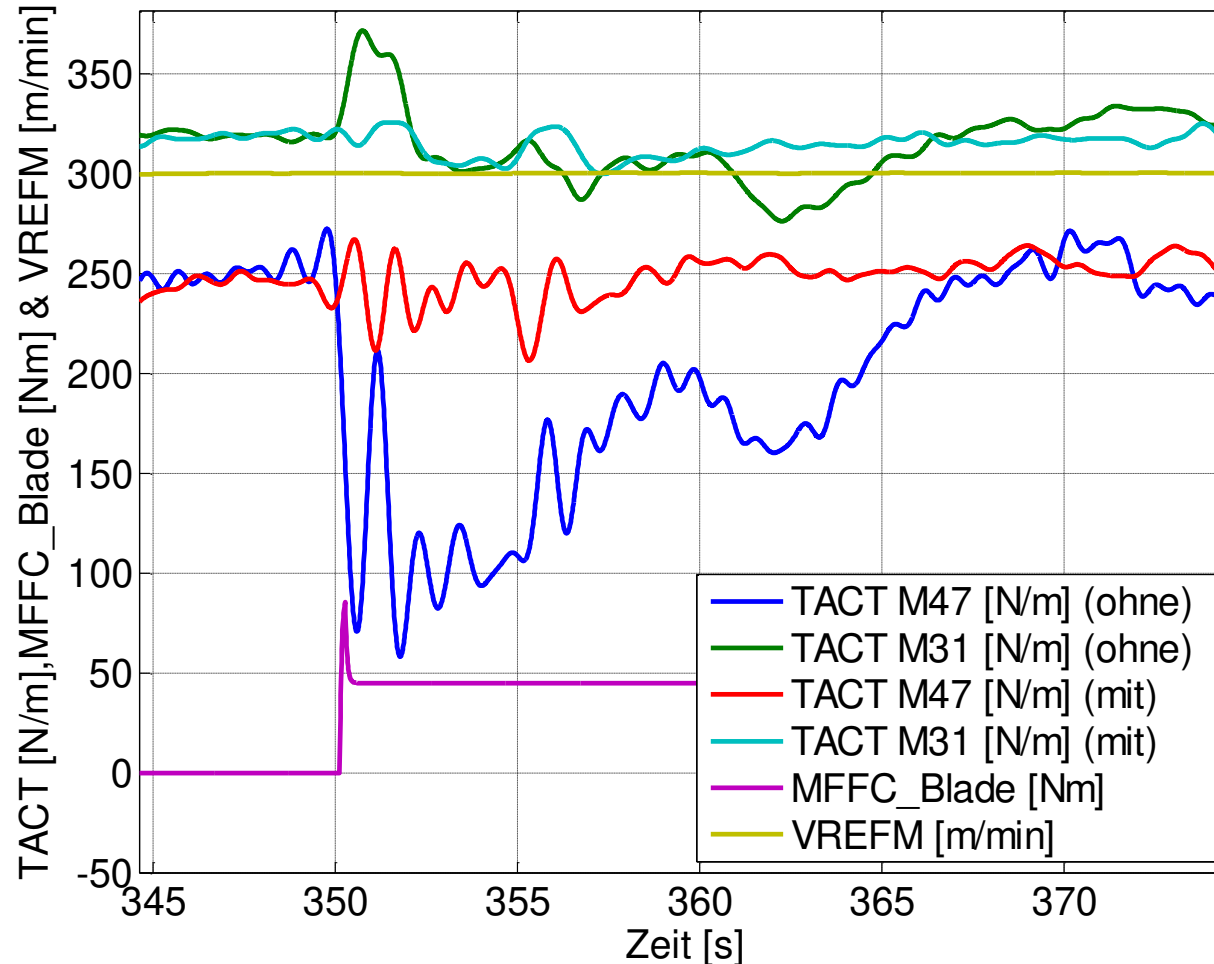
Rakelvorsteu-
erung

Zusammen-
fassung &
Ausblick

Rakelvorsteuerung (Störgrößenaufschaltung)

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

Rakelvorsteuerung VESTRA Bentblade (20.04.07 - I.B)



Überblick &
Forschungsziel

Anlage,
Komponenten &
Datensammlung

Modellierung
und Analyse

Schnittstelle

Dezentrale
Entkopplung

Rakelvorsteu-
erung

Zusammen-
fassung &
Ausblick

Zusammenfassung & Ausblick

1. **Forschungsziel wurde erreicht:**
 - **Verbesserte Regelgüte & Entkopplung (M31)**
 - **Rakelvorsteuerung minimiert Bahnzugeinbruch (M47)**
2. **Schnittstelle dSPACE – S5 erweiterbar (z.B. Regelung der Abrollung)**
3. **Modulare Simulationsbausteine (HLG, Klemmstellen mit/ohne elastischem ZMS, Regler, Vorsteuerung)**
4. **Simulationsaufbauten beliebiger Anlagen (z.B. Folienindustrie) möglich**
5. **Ausführliche Simulations- & Messergebnisse**

Überblick &
Forschungsziel

Anlage,
Komponenten &
Datensammlung

Modellierung
und Analyse

Schnittstelle

Dezentrale
Entkopplung

Rakelvorsteu-
erung

Zusammen-
fassung &
Ausblick