



Prüfinstitut für Betriebsfestigkeit und  
Schienenfahrzeugtechnik GmbH



## Innovatives Prüfstandskonzept für Schienenfahrzeugbremsen

Peter Brunnhofer<sup>1,2</sup>, Robert Bauer<sup>3</sup>,  
Martin Leitner<sup>1,2</sup>, Wolfram Rossegger<sup>3</sup>, Werner Matschnigg<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institut für Betriebsfestigkeit und Schienenfahrzeugtechnik, Technische Universität Graz

<sup>2</sup> PBS Testing, Prüfinstitut für Betriebsfestigkeit und Schienenfahrzeugtechnik

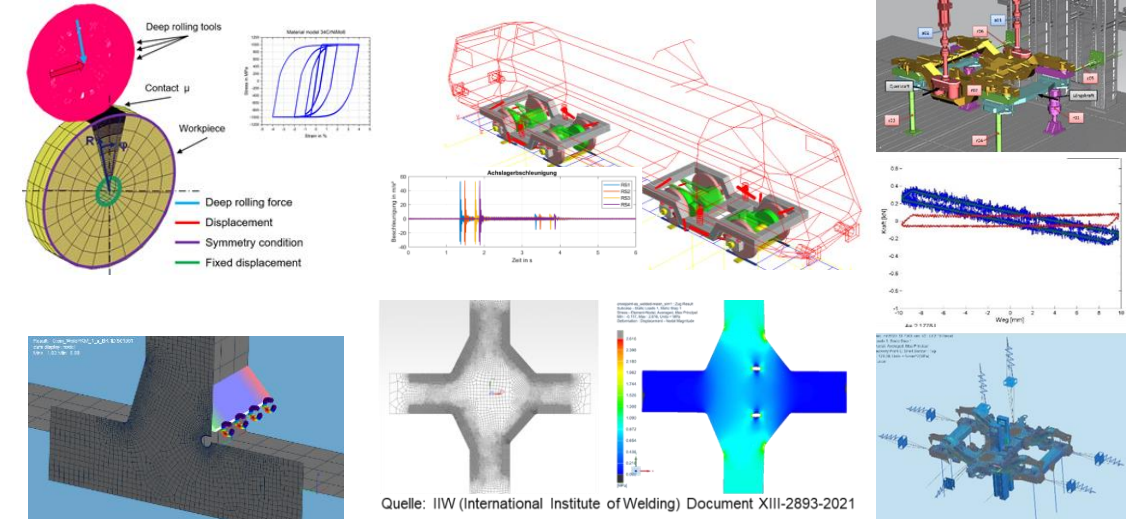
<sup>3</sup> KS Engineers Kristl, Seibt & Co GmbH

48. Tagung „Moderne Schienenfahrzeuge“, 18. September 2023



# Forschungsschwerpunkte

- Bewertung der Betriebsfestigkeit und Lebensdauer von Maschinen- und Schienenfahrzeugbauteilen
- Analyse des Ermüdungsverhaltens unter Berücksichtigung grundlegender Aspekte, wie beispielsweise Konstruktion und Belastung sowie Werkstoff und Fertigung
- Entwicklung von Auslegungsmethoden und Werkzeugen auf Basis experimenteller, analytischer und numerischer Analysen

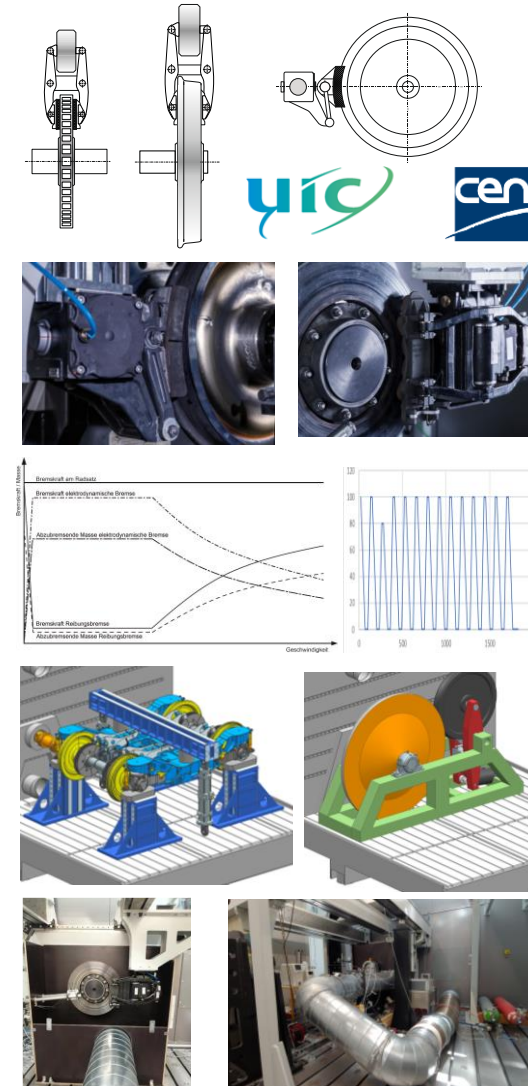


- Erarbeitung und Umsetzung von Leichtbau-Konstruktionsprinzipien
- Sonderprüfstandbau sowie Durchführung von Betriebslastmessungen und Messdatenauswertung
- Untersuchung über mehrere Größenskalen, von Kleinproben über einzelne Komponenten bis hin zu gesamten Baugruppen



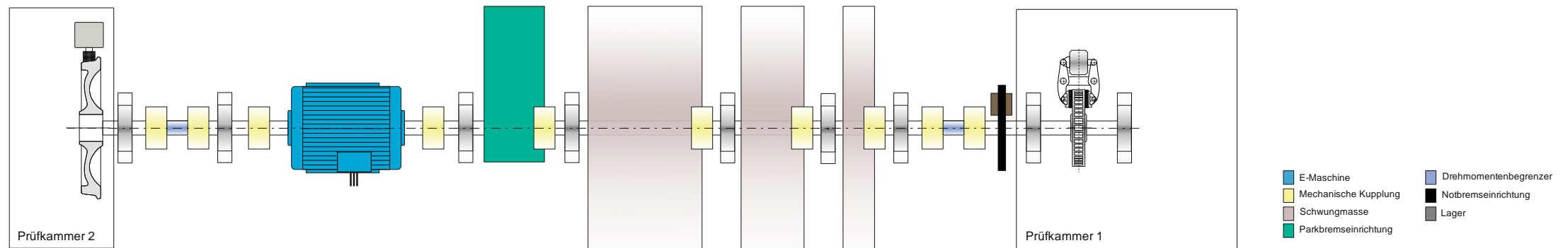
# Anforderungen an den Prüfstand

- Durchführung von Versuchen zur Zertifizierung von Bremsbelegen (UIC-Kodex 541-3), Bremsklotzsohlen (UIC-Kodex 541-3) und Vollräder (UIC-Kodex 510-5, EN 13979-1) sowie UIC-Zertifizierung des Bremsenprüfstands gemäß den Anforderungen nach IRS 50548: Bremse - Anforderungen an Reibprüfstände für die internationale Zertifizierung von Bremsbelägen und Bremssohlen
- Einbindung von Originalbremsausrüstung (pneumatisch/hydraulisch/elektromechanisch/elektrohydraulisch Aktuator, Bremssteuerung)
- Fahrspielsimulation, realitätsnahe Betriebsszenarien (stufenlos Einstellung der abzubremsenden Masse, Darstellung von rasch veränderlichen Betriebszuständen)
- Vorgabe unterschiedlichster Regelgrößen (Bremskraft, -druck, Verzögerung, Bremsleistung)
- Untersuchung der Wechselwirkung der Bremse mit den anderen Komponenten des Fahrwerks (Einbindung eines kompletten Fahrwerks)
- Einfache Erweiterbarkeit (Bremsausrüstung, Prüfeinrichtung, Messtechnik, ...)
- Partikelmessung

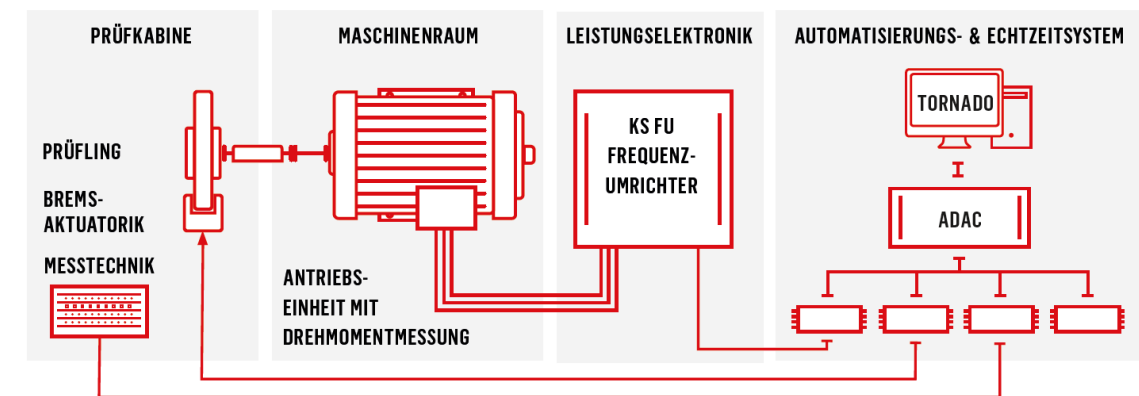
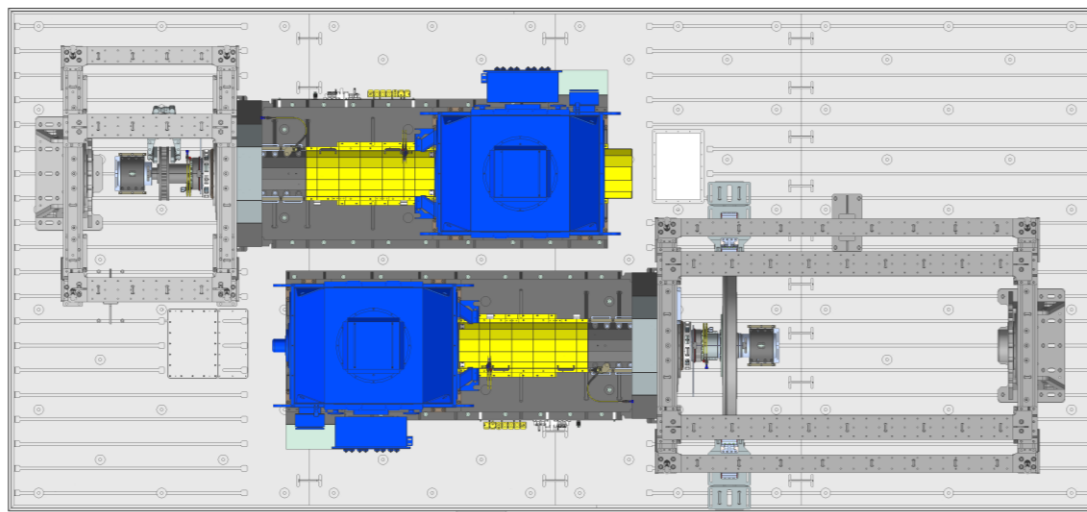


# Prüfstandskonzept

## Prüfstand mit mechanischer Schwungmasse



## Prüfstand mit rein simulierten Schwungmassen



# Prüfstands Aufbau



## MASCHINENRAUM

Mit den beiden Antriebseinheiten samt Wellenstrang, Drehmomentmessung und Zwischenlagereinheiten.

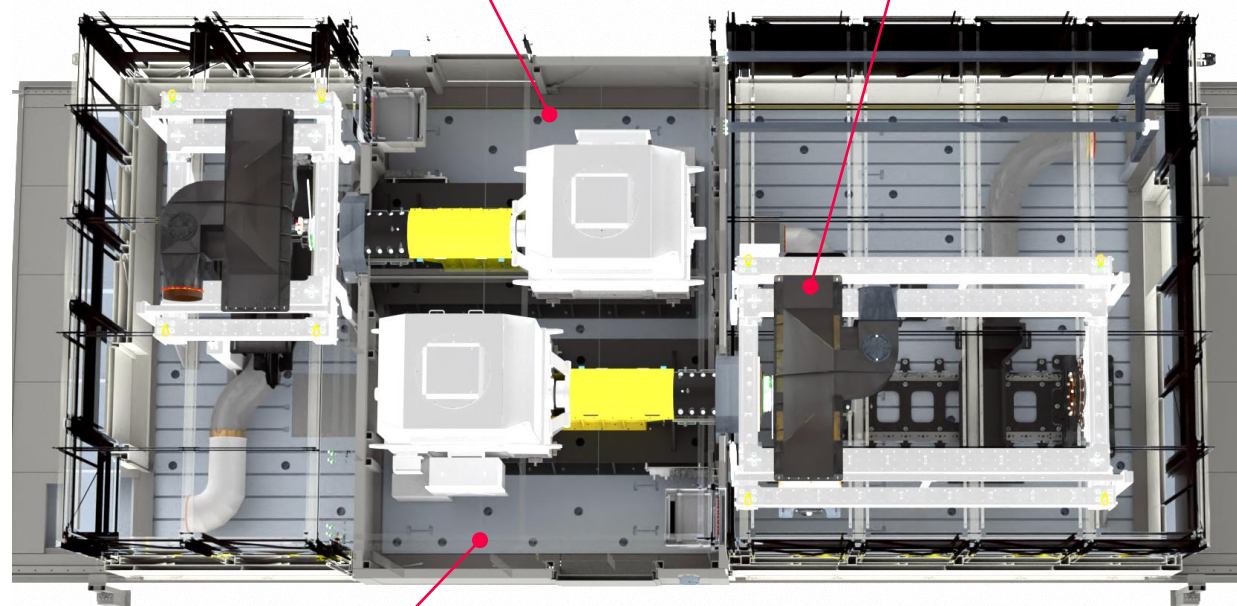
## ZU- / ABLUFTSYSTEM

15 000 m<sup>3</sup>/h Zuluft je Kammer  
16 000 m<sup>3</sup>/h Abluft je Kammer  
Bündelung des ges. Luftstromes in die große Prüfkammer



## SCHWINGFUNDAMENT

Schwingungsentkoppeltes Fundament bestehend aus Stahlguss-Aufspannplatten verbunden mit einem darunterliegenden Betonkörper.



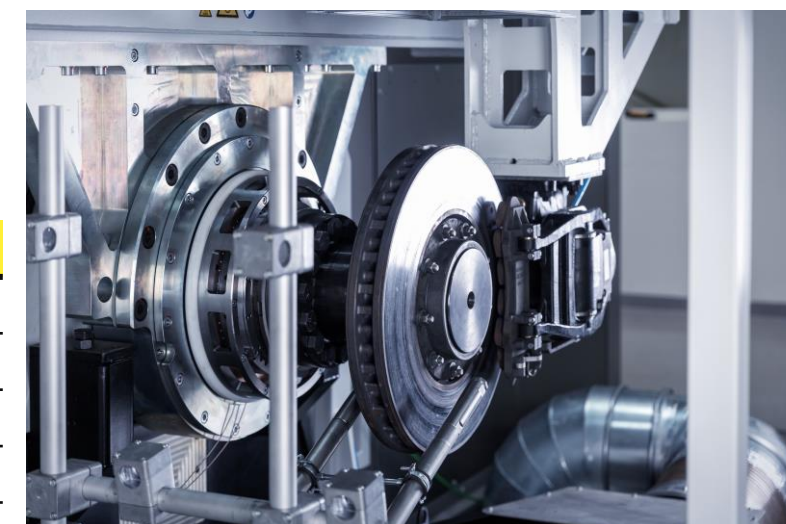
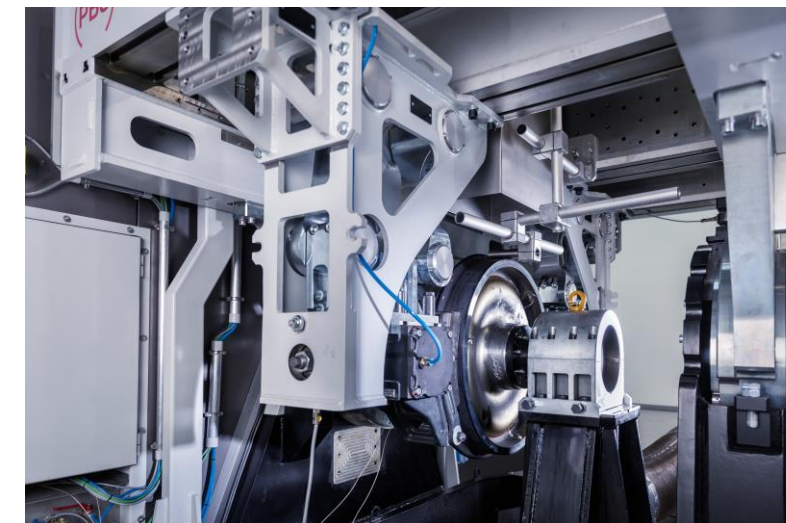
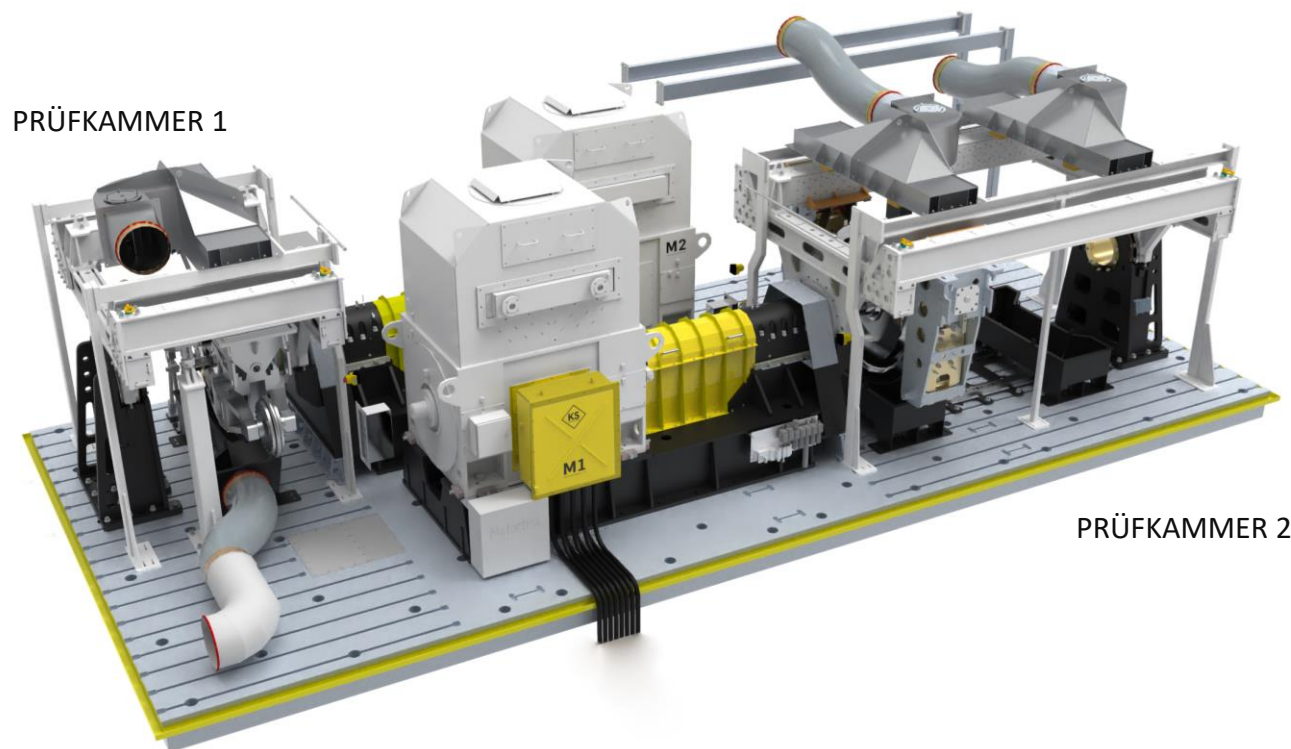
## FREQUENZUMRICHTER

Der KS-FU wurde speziell für hochdynamische Regelungsaufgaben entwickelt.





# Technische Daten

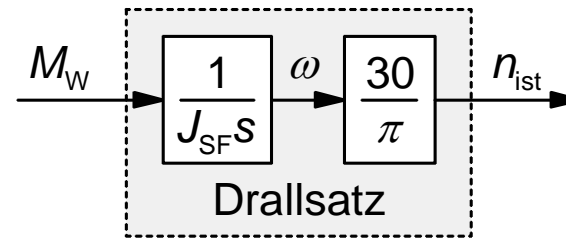
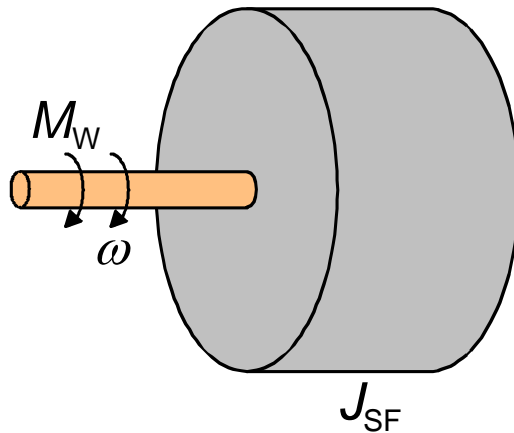


## Technische Daten

Leistung (Motor)	1.4 MW	Max. Bremsdruck	16 bar
Max. Bremsmoment	35 000 Nm bis 400 rpm	Max. Bremskraft Bremszange	140 kN (pneumatisch)
Dauerbremsmoment	9 200 Nm	Max. Bremskraft Klotzbremse	60 kN (pneumatisch)
Max. Drehzahl	3 000 min <sup>-1</sup>	Max. Prüflingsdurchmesser	1,5 m

# Trägheitsnachbildung

- Wunsch: Trägheitsmoment  $J_{SF}$  soll am Prüfstand auf Bremse wirken

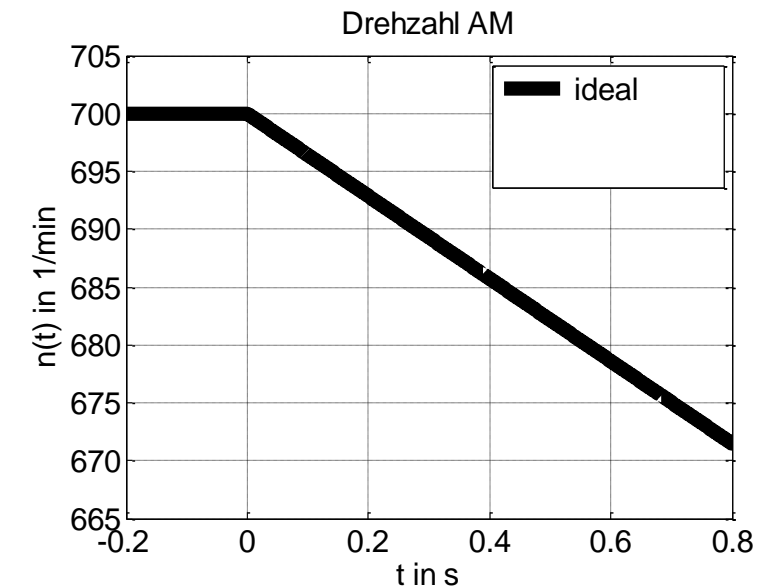


Drallsatz:

$$J_{SF} \frac{d\omega}{dt} = M_W$$

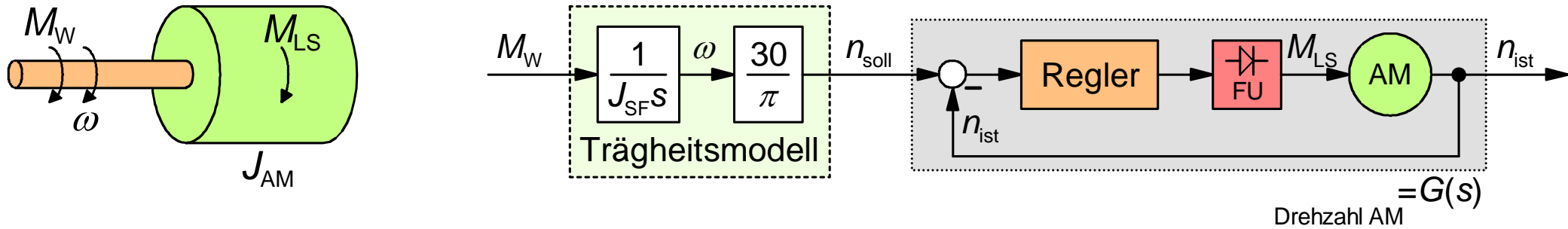
Übertragungsfunktion:

$$T_{ideal}(s) = \frac{n_{ist}(s)}{M_W(s)} = \frac{1}{J_{SF}s} \frac{30}{\pi}$$



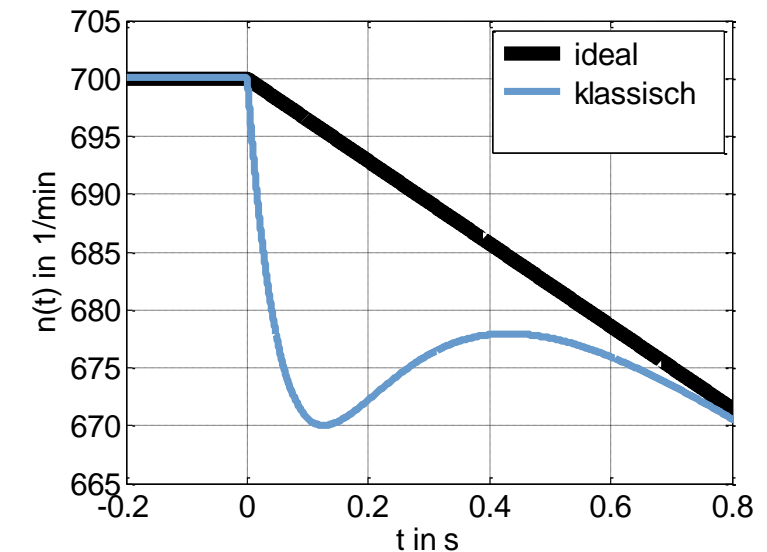
# Trägheitsnachbildung

- Klassische Trägheitsnachbildung



Übertragungsfunktion:

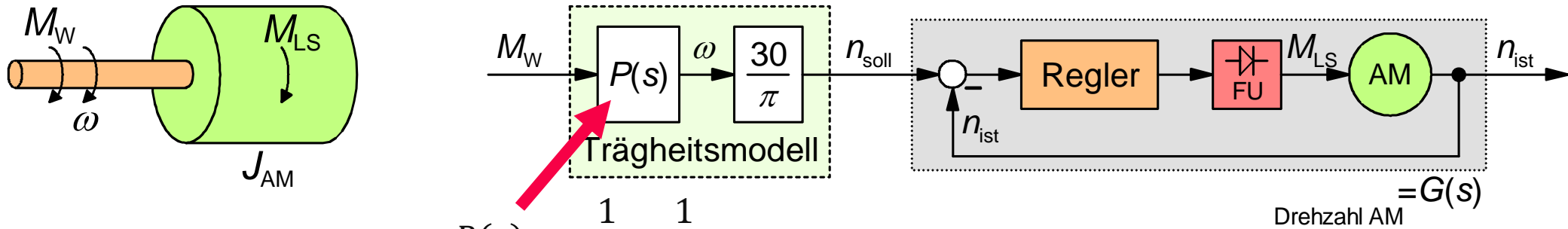
$$T_{\text{klassisch}}(s) = \frac{n_{\text{ist}}(s)}{M_W(s)} = \frac{1}{J_{\text{SF}}s} \frac{30}{\pi} G(s) \neq T_{\text{ideal}}(s)$$





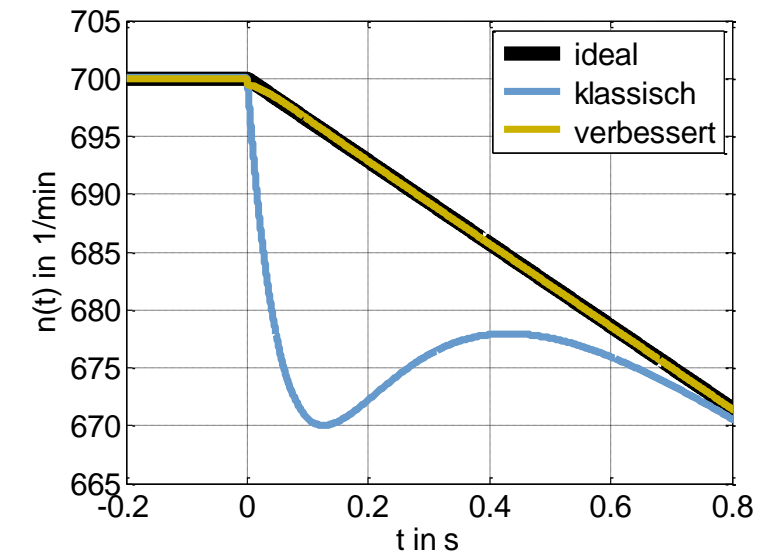
# Trägheitsnachbildung

- Verbesserte Trägheitsnachbildung



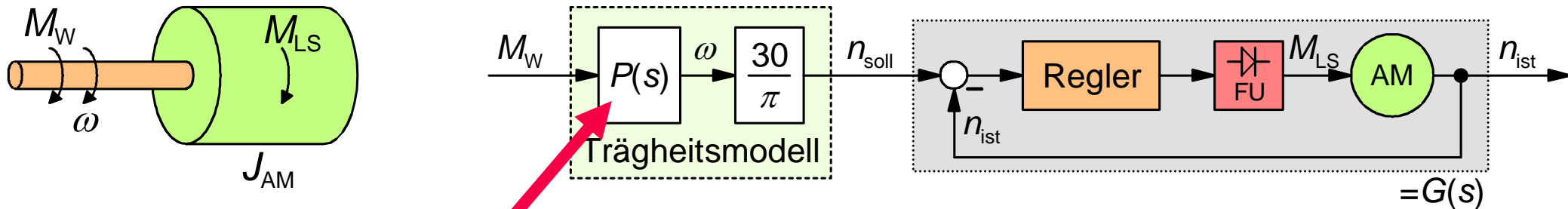
Übertragungsfunktion:

$$T_{\text{verbessert}}(s) = \frac{n_{\text{ist}}(s)}{M_W(s)} = \frac{1}{J_{\text{SF}} s} \frac{1}{G(s)} \frac{30}{\pi} G(s) = T_{\text{ideal}}(s)$$



# Trägheitsnachbildung

- Verbesserte Trägheitsnachbildung



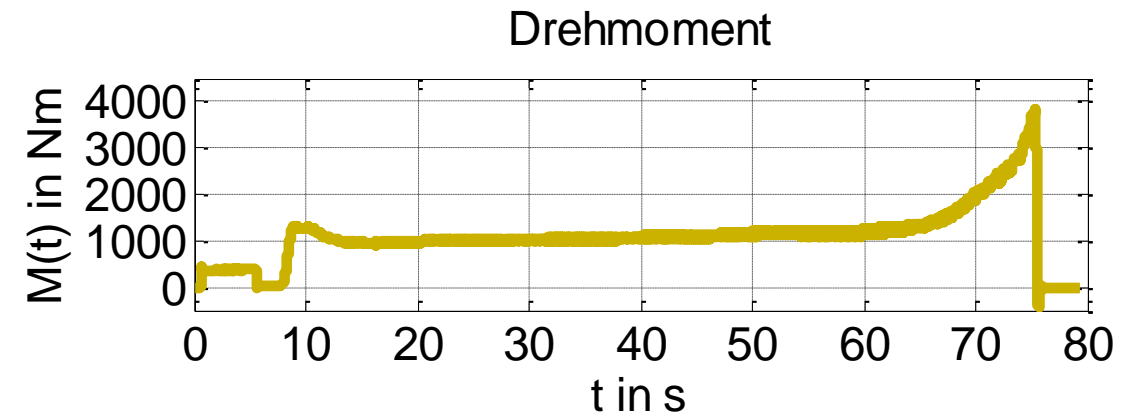
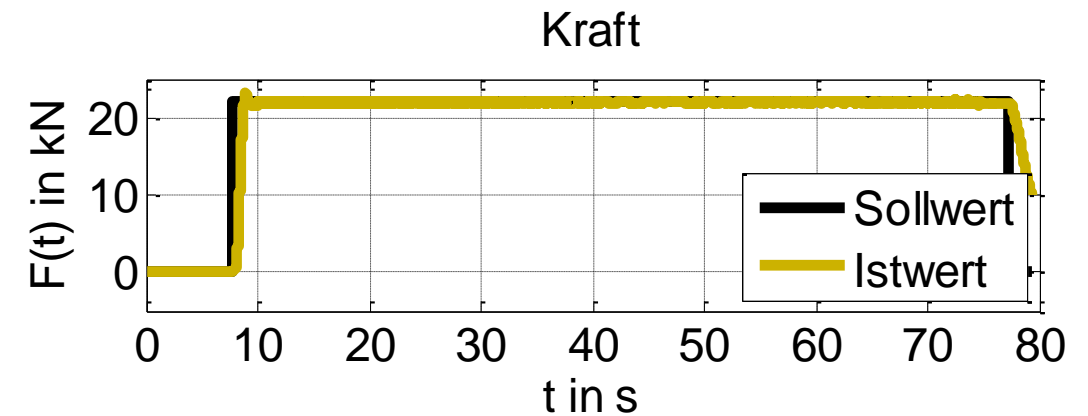
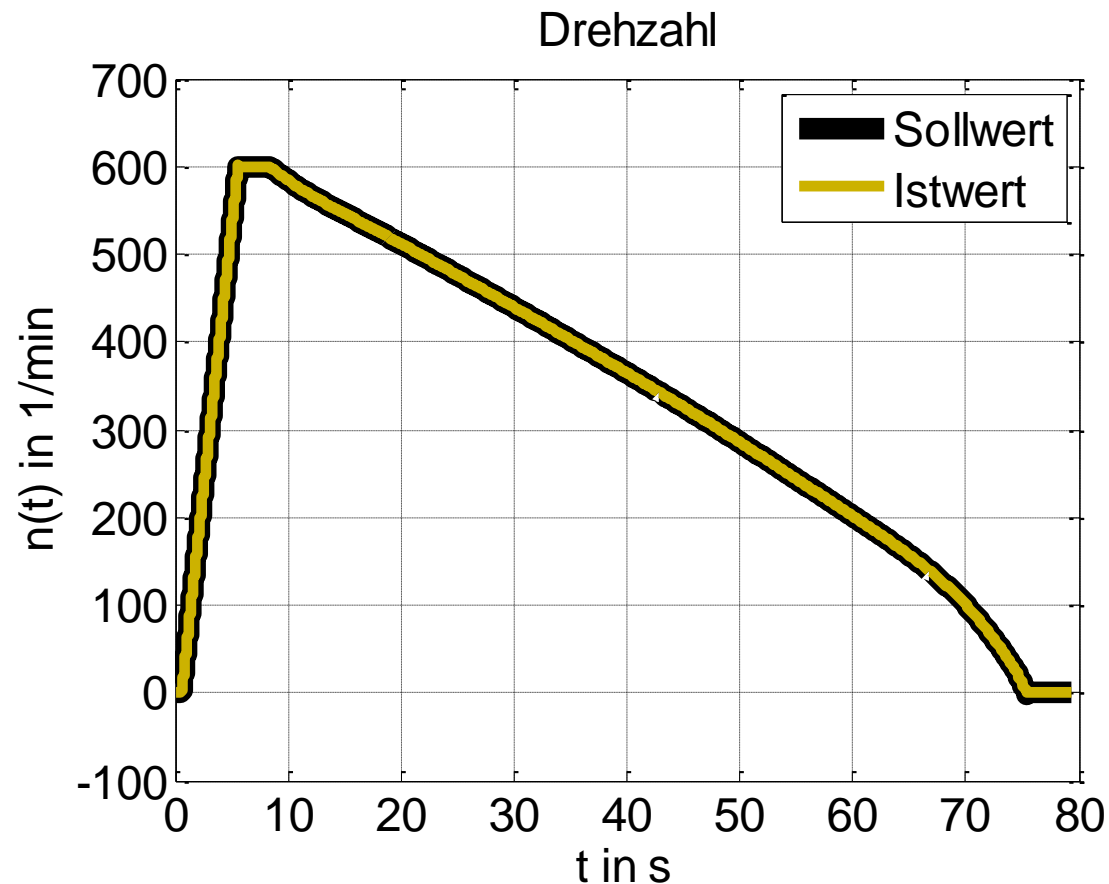
- Beispiel:

$$G(s) = \frac{a_0}{s + a_0} \longrightarrow P(s) = \frac{1}{J_{SF}s} \frac{1}{G(s)} = \frac{1}{J_{SF}s} \frac{s + a_0}{a_0} = \underbrace{\frac{1}{J_{SF}s}}_{\text{Drallsatz}} + \underbrace{\frac{1}{J_{SF}a_0}}_{\text{Durchgriffsterm}}$$

- Voraussetzung:  
Keine Totzeit in Dynamik der Drehzahlregelung,  
also kein Bussystem zwischen Regelung und Umrichter

# Trägheitsnachbildung

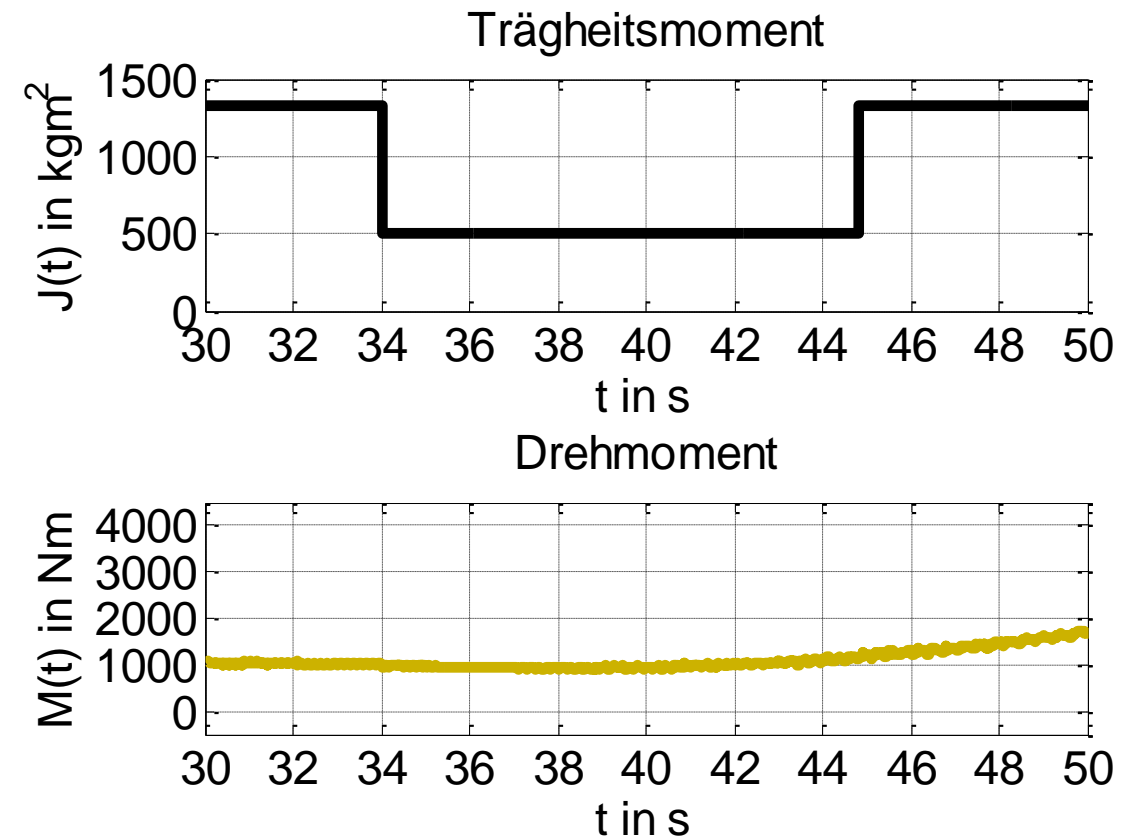
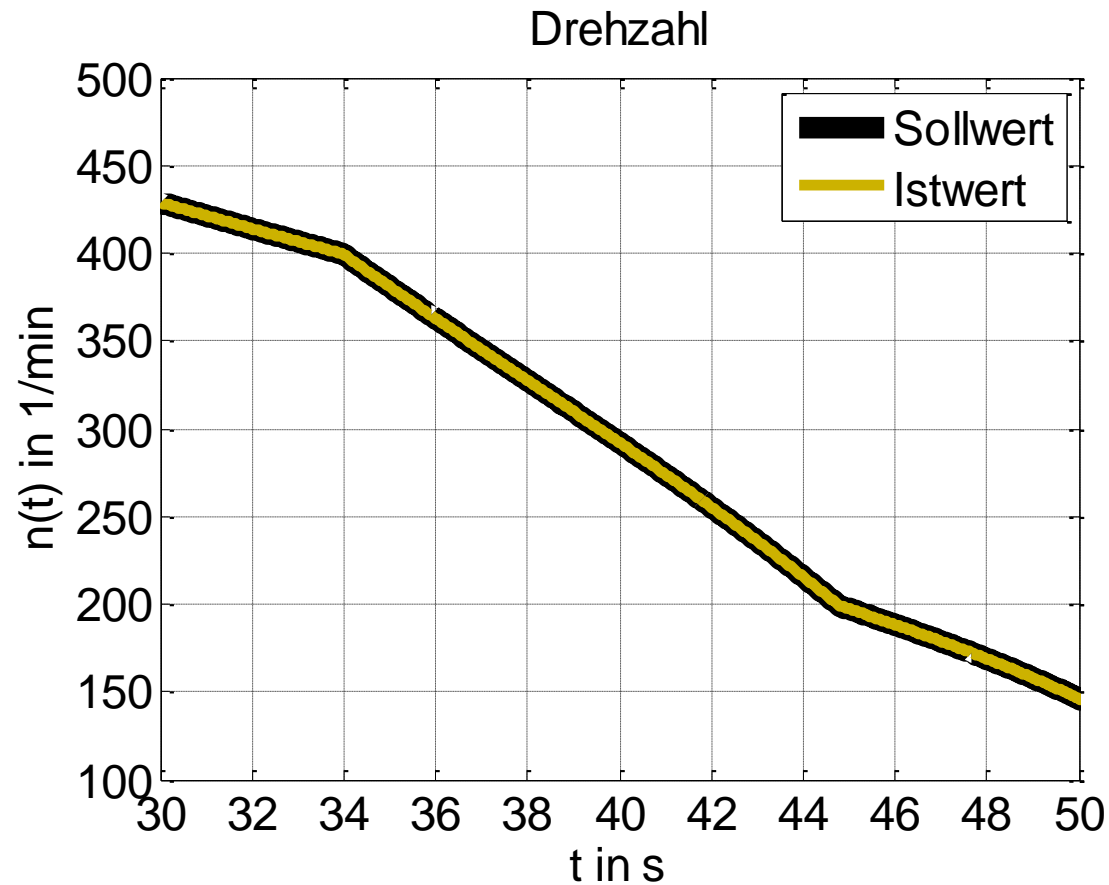
- Haltebremsversuch mit Klotzbremse, konstante Bremsklotz-Kraft





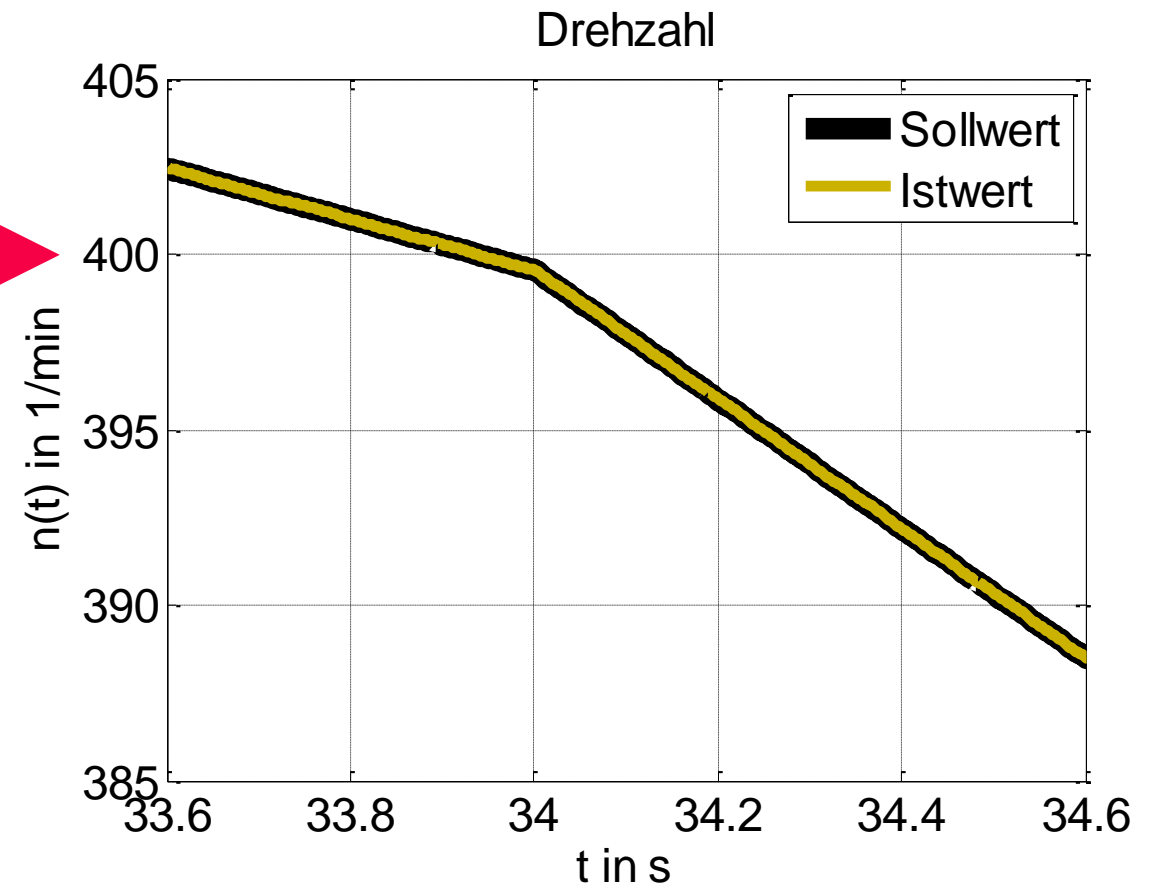
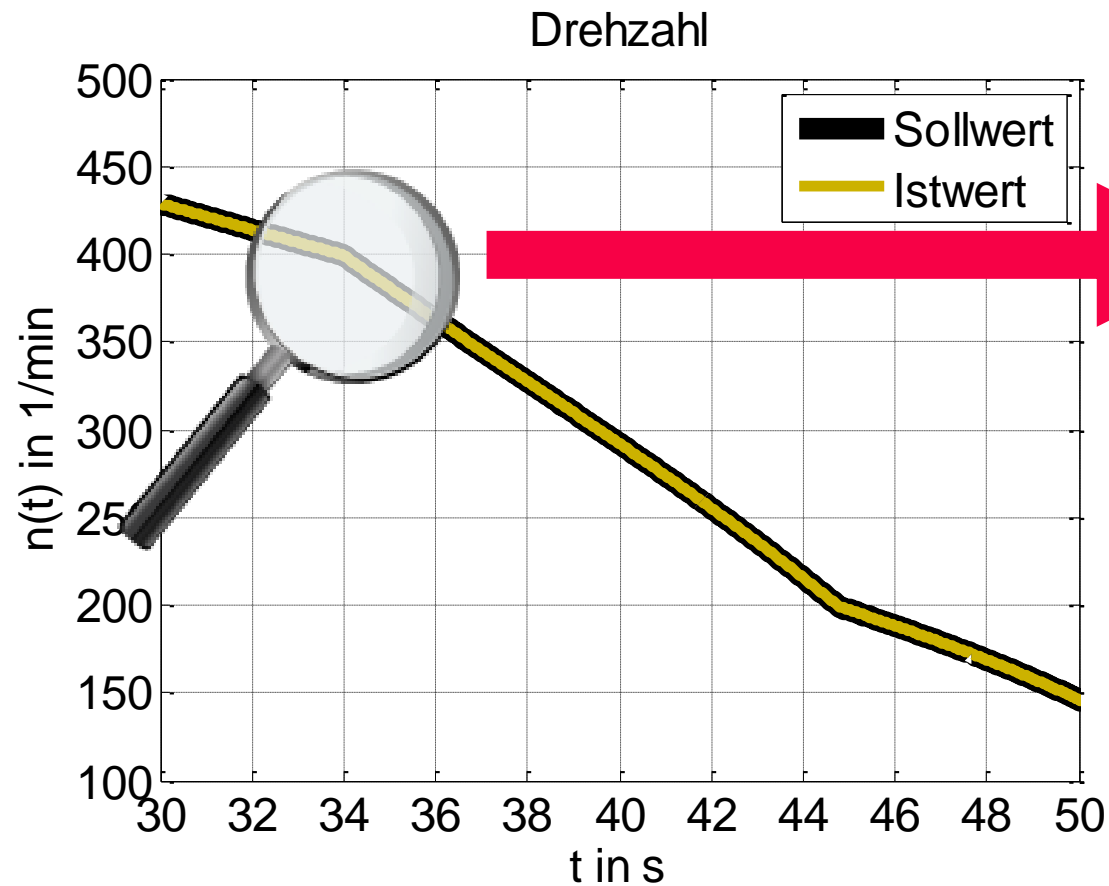
# Trägheitsnachbildung

- Versuch mit Bremsblending



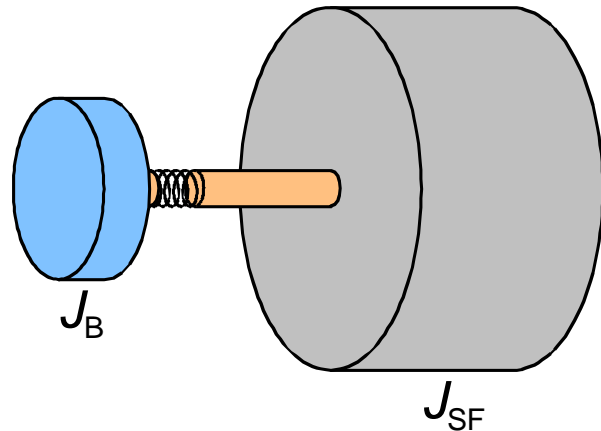
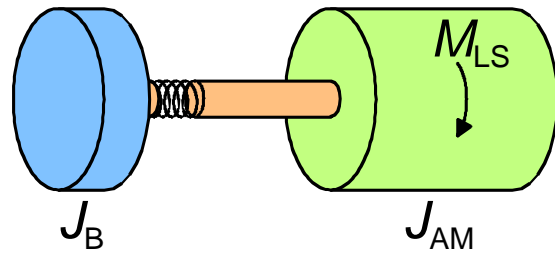
# Trägheitsnachbildung

- Versuch mit Bremsblending

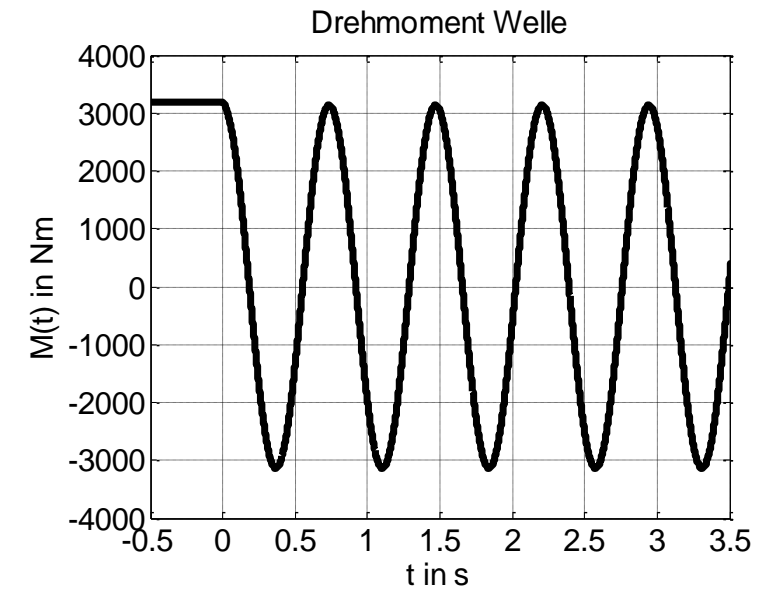
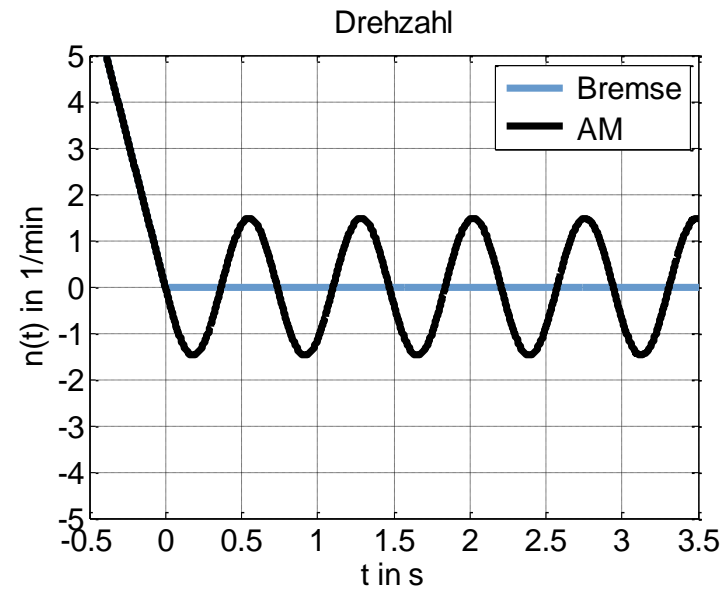


# Dämpfung

- Problem: Schwach gedämpfter Zwei-Massen-Schwinger



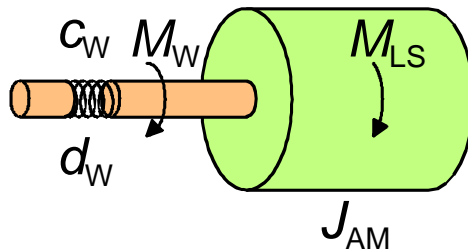
Anregung beispielsweise durch Halteruck:





# Dämpfung

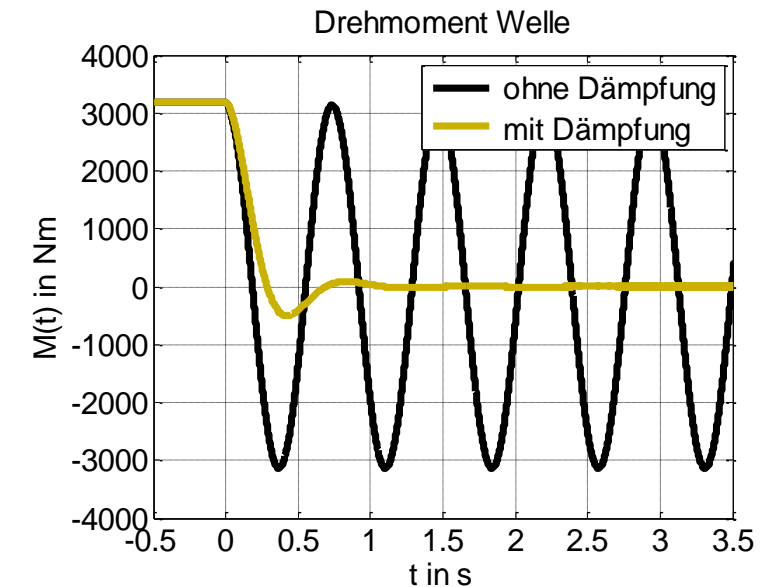
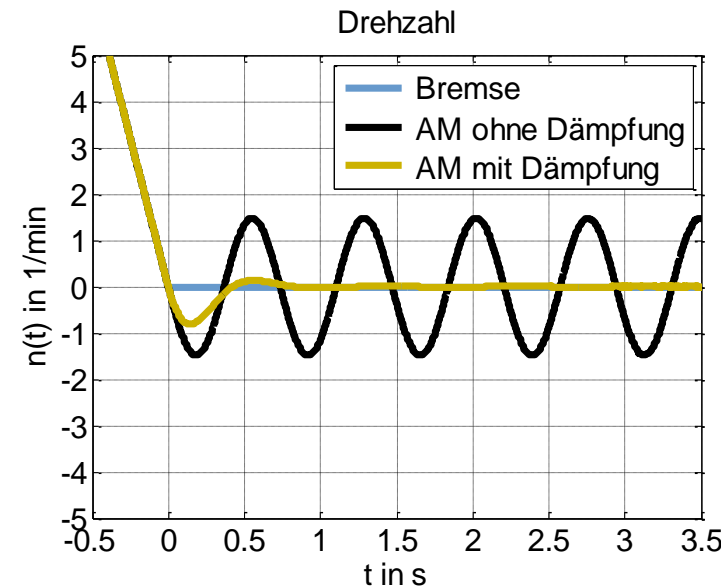
- Idee: Regelungstechnische Erhöhung der Wellendämpfung



Wellenmoment:  $M_W = c_W \Delta \varphi + d_W \Delta \omega$

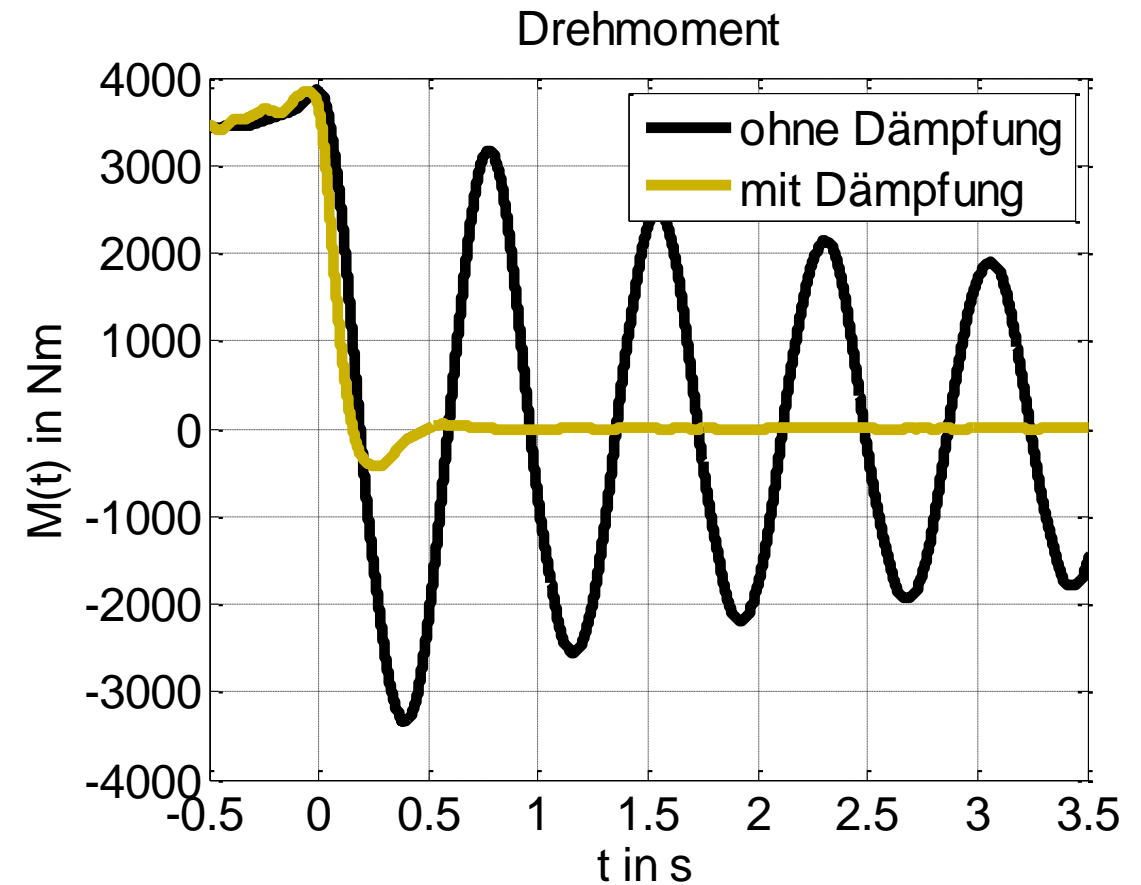
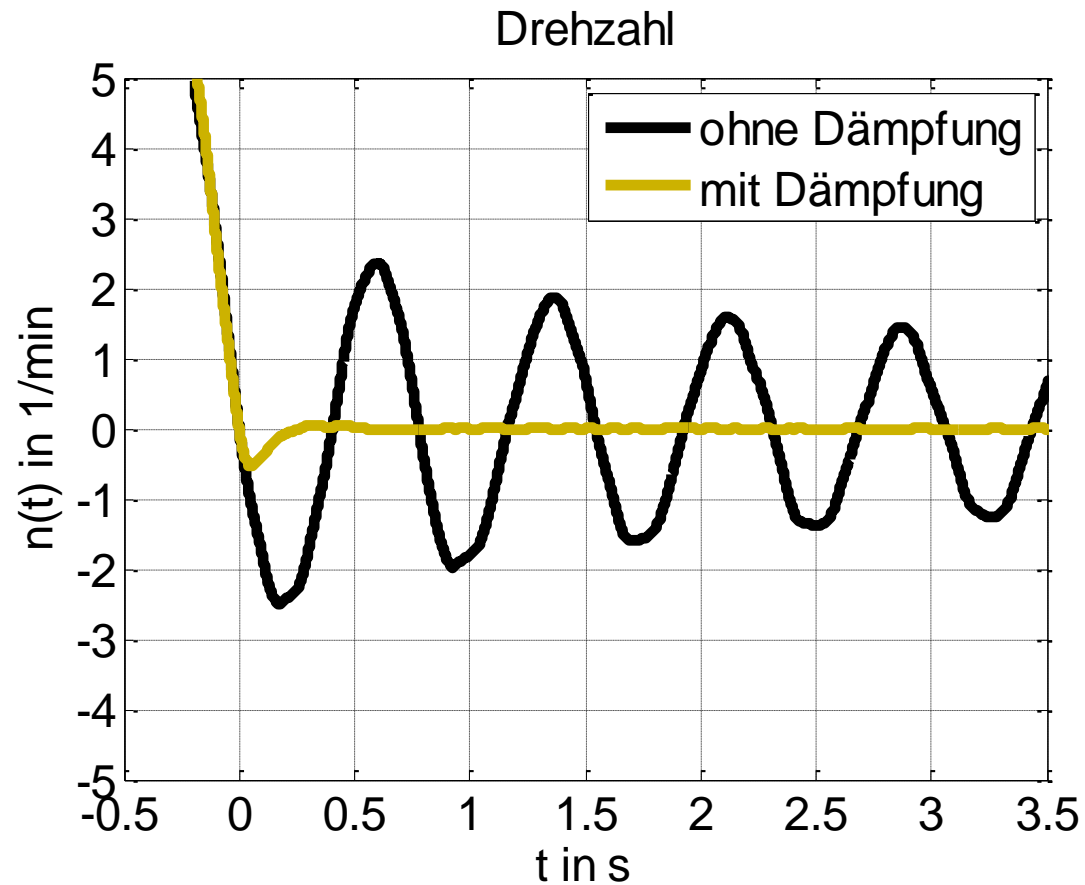
Dämpfungsmoment:  $M_{LS} = d_R \Delta \omega$

- Voraussetzung:  
Schätzung von  $\Delta \omega$   
mittels Kalman-Filter



# Dämpfung

- Versuch (fast) ohne/mit Dämpfung

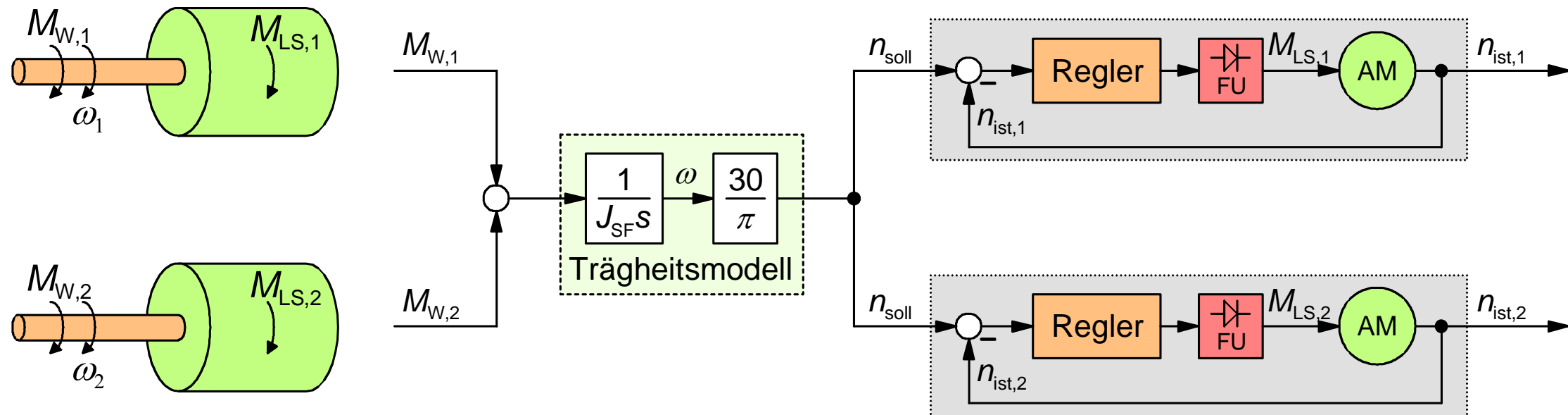






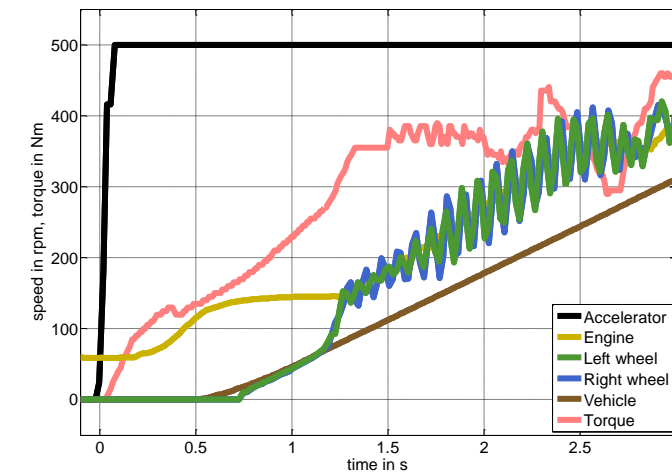
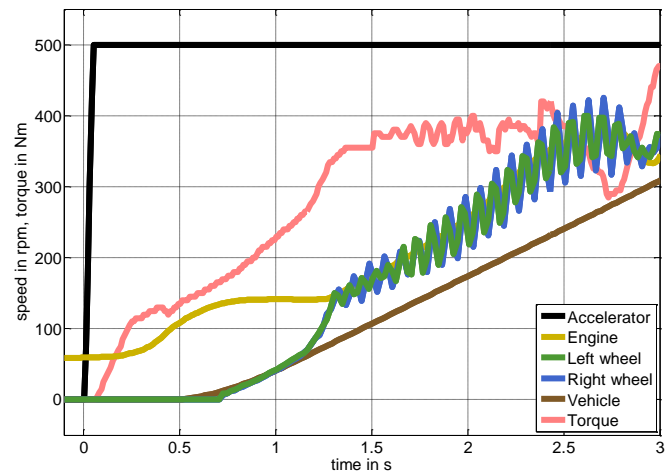
# Koppelung

- Umsetzung: Gemeinsamer Drallsatz



# Ausblick

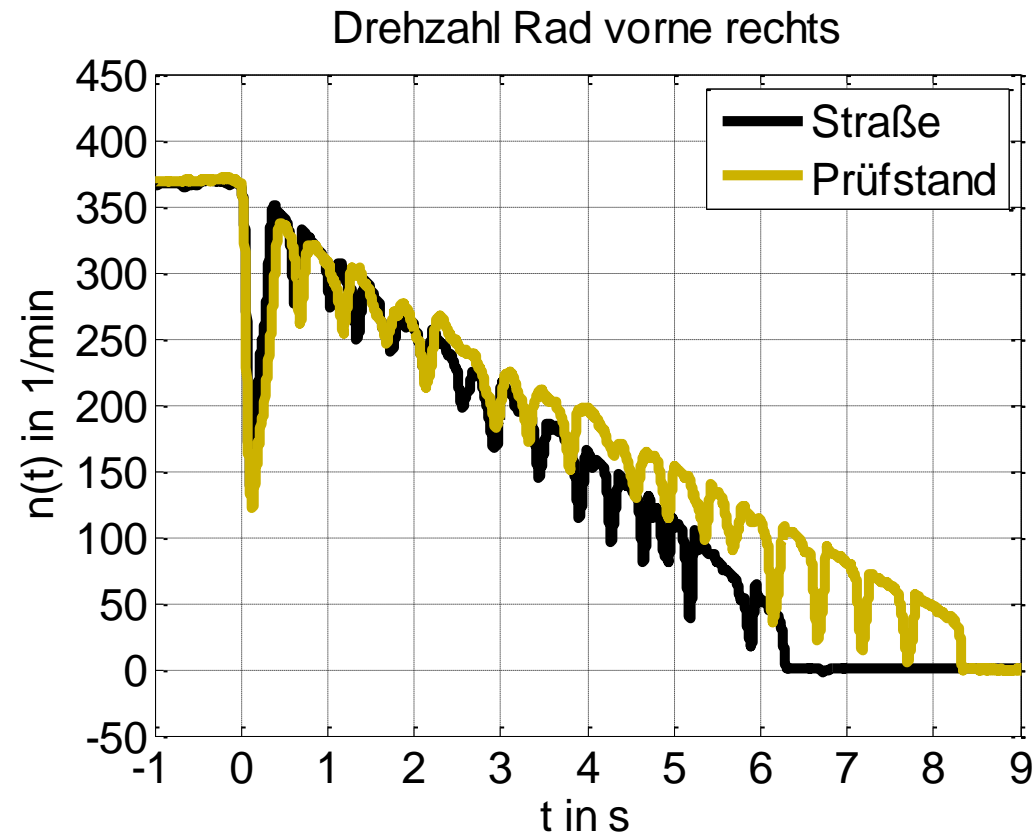
- Regelkonzepte schon lange im automotiven Bereich im Einsatz, z.B. Fahrbarkeitsapplikation am Prüfstand



Bauer R. et al.: Modification of Pacejka's Tyre Model in the High Slip Range for Model-Based Drivability Calibration. International Conference on Calibration, Berlin, 2019

# Ausblick

- Schlupfendes Rad mit Reifenmodell, ABS-Bremmung auf  $\mu$ -low

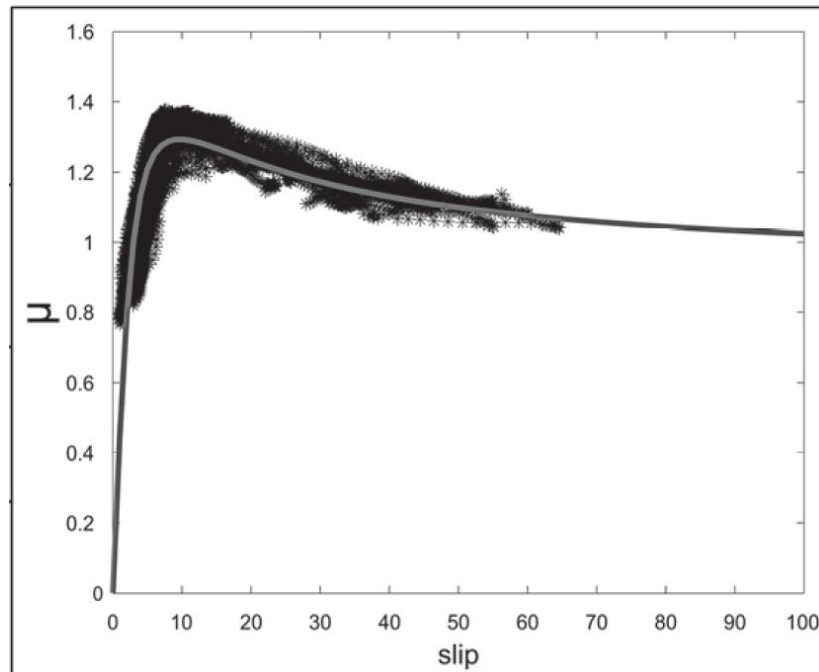


Ott M. et al.: Endlich Road to Rig: Durchgängige Entwicklungsmethodik mittels innovativem Prüfstandssystem für die vollumfängliche Validierung von alternativen Antriebssystemen  
34. Internationales Wiener Motorensymposium, 2013

# Ausblick

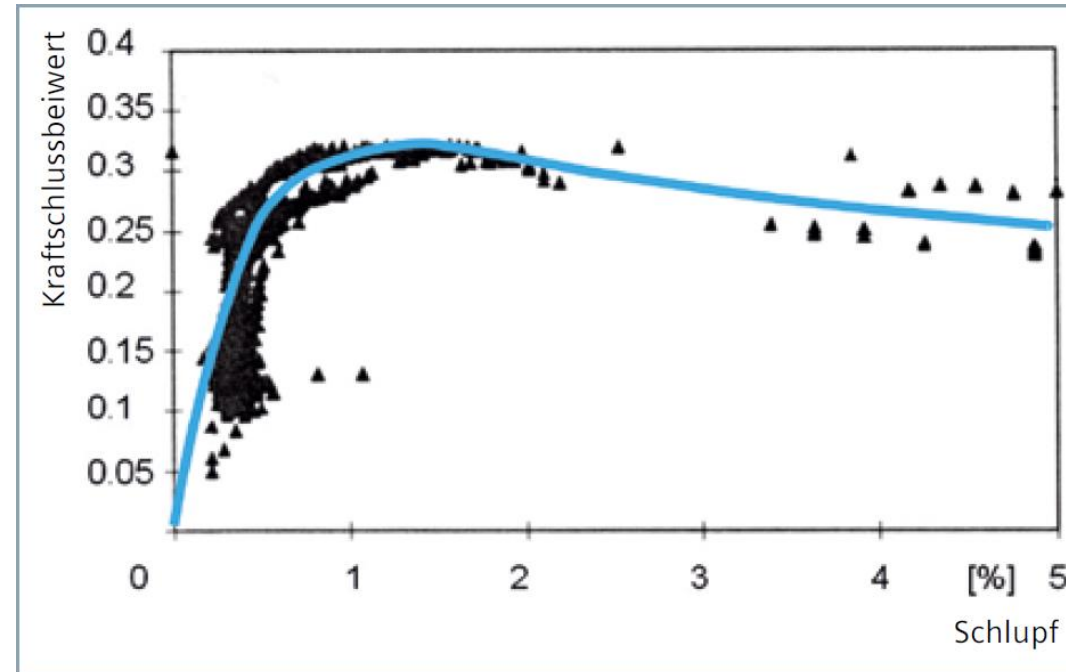
- Schlupfendes Rad mit Reifenmodell

PKW-Radverhalten



Weber S. et al.: Investigations of the process of road matching on powertrain test rigs. 17. Internationales Stuttgarter Symposium, S. 1247–1261, Springer, 2017

Schienenfahrzeug-Radverhalten

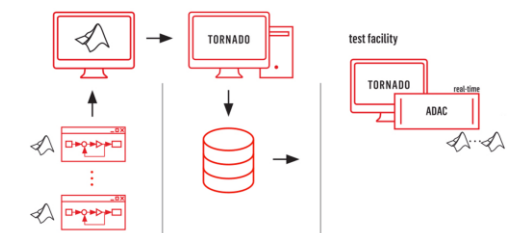
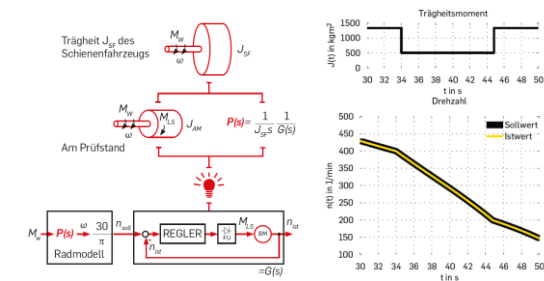
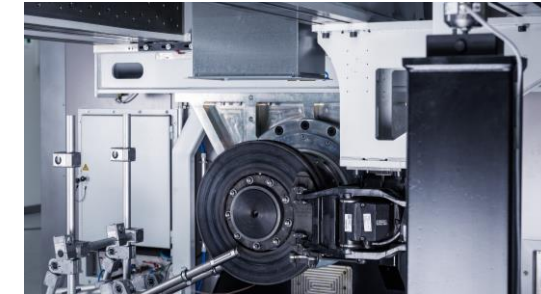


Meyer A.: Radsatz- oder Einzelfahrwerke – von der Theorie zur Praxis. Siemens AG, 2016



# KEY-FEATURES

- Hohes Maß an Flexibilität in Bezug auf Testbedingungen und Einbindung von Originalausrüstung (Bremsaktuatoren, Bremssteuergerät, ...)
- Rein elektrische Trägheitsnachbildung (leistungsstarke und hochdynamische Regelungs- und Stromrichtertechnik)
- Hoher Automatisierungsgrad
- Realitätsnahe Betriebsszenarien (stufenlos Einstellung der abzubremsenden Masse)
- Offenes erweiterbares System - Einfache Messgeräteintegration durch Kommunikationsstandards wie EtherCAT, CAN, etc.
- Modernes und leistungsstarkes Telemetriesystem (16 Messkanäle am rotierenden System für Temperaturmessung und weitere 16 Kanäle für die Dehnungsmessung)
- Einbindung von MATLAB- und Simulink-Modellen in die Echtzeitsteuerung (T-Sim)
- Virtuelle Koppelung der beiden Prüfkammern zu einem Verbundbetrieb
- Untersuchung der Wechselwirkung Bremssystem Fahrwerk





Prüfinstitut für Betriebsfestigkeit und  
Schienenfahrzeugtechnik GmbH



„Der Wert einer Idee liegt in ihrer  
Nutzung“

Thomas Edison (1847 – 1931)



# Kontakt

Technische Universität Graz  
Institut für Betriebsfestigkeit und  
Schienenfahrzeugtechnik  
Inffeldgasse 25/D, 8010 Graz, Österreich  
[www.bst.tugraz.at](http://www.bst.tugraz.at)



Prüfinstitut für Betriebsfestigkeit und  
Schienenfahrzeugtechnik GmbH  
Inffeldgasse 25/D, 8010 Graz, Austria



Institutsleiter, Geschäftsführer  
**Martin Leitner**  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.mont. MBA  
Tel. +43 316 873 - 1363  
[martin.leitner@tugraz.at](mailto:martin.leitner@tugraz.at)

Stv. Institutsleiter, Technischer Leiter  
**Peter Brunnhofer**  
Ass.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn.  
Tel. +43 316 873 - 1380  
[peter.brunnhofer@tugraz.at](mailto:peter.brunnhofer@tugraz.at)

KS Engineers Kristl, Seibt & Co GmbH  
Harter Straße 4, 8053 Graz, Österreich  
[www.ksengineers.com](http://www.ksengineers.com)



Mitglied der Geschäftsführung  
**Wolfram Rossegger**  
Dipl.-Ing. Dr.techn.  
[wolfram.rossegger@ksengineers.com](mailto:wolfram.rossegger@ksengineers.com)

Technologie-Koordinator für Modellbildung, Simulation  
und Regelungstechnik  
**Robert Bauer**  
Priv.-Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn.  
[robert.bauer@ksengineers.com](mailto:robert.bauer@ksengineers.com)

Bereichsleitung für Engineering Maschinenbau  
Automotive Testing und FC-Testing bei KS Engineers  
**Werner Matschnigg**  
[werner.matschnigg@ksengineers.com](mailto:werner.matschnigg@ksengineers.com)