

Diplomarbeit:

Entwicklung eines Antiblockiersystems mit Elektromotoren für starke Elektrofahrzeuge

Autor: Mario Teitzer
Betreuung: Prof. Dr. Luigi del Re
 Dr. Daniel Alberer
 Dr. Ralf Stroph
Partner: BMW Group Forschung und Technik
Fertigstellung: August 2010

Kurzfassung

In dieser Diplomarbeit wurden für ein Elektrofahrzeug mit zwei unabhängig regelbaren permanentenregten Synchronmaschinen (PMSM), welche direkt die Hinterräder antreiben, verschiedene modellbasierte Radschlupfregler für ein Antiblockiersystem (ABS) entwickelt und mit einem Serien-ABS verglichen.

Für die Simulation in MATLAB/Simulink wurde zunächst die Längsdynamik eines Elektrofahrzeugs modelliert, welches durch je eine PMSM und ein zweistufiges Stirnradgetriebe pro Hinterrad angetrieben und verzögert wird. Das nichtlineare Motormodell berücksichtigt die Effekte der Ankerrückwirkung, der magnetischen Sättigung des Statorisens und der magnetischen Reluktanz welche zu einem zusätzlichen Motordrehmoment bei Betrieb mit Feldschwächung führt.

Zur feldorientierten Drehmomentsteuerung der eingesetzten PMSM wird eine Methode vorgestellt, um mit Hilfe offline berechneter wirkungsgradoptimaler Stromkennfelder eine stationäre Inversion der Drehmomentbeziehung zu erreichen. Die Inversion wurde als ein Optimierungsproblem zur Minimierung der im stationären Betrieb auftretenden Motorverluste formuliert, und mit Hilfe einer numerischen Methode der sequentiellen quadratischen Programmierung (SQP) für diskrete Arbeitspunkte in MATLAB gelöst. Für die den Kennfeldern nachgeschalteten modellbasierten Stromregler wurden Conditional Feedback Regler entworfen, bei denen das sehr gut bekannte Modellwissen der Stromregelstrecke verwendet werden konnte, um einen auf Störgrößen und Parametervariationen optimierten Reglerentwurf vornehmen zu können.

Der zweite Teil dieser Arbeit beschäftigt sich mit der Radschlupfregelung mit den Elektromotoren als Bremsaktuatoren, welche im generatorischen Betrieb kinetische Energie rekuperieren. Es wurde zunächst ein Gain-Scheduling PI-Regler entwickelt, der die Abhängigkeit der Radschlupfdynamik von der Fahrgeschwindigkeit durch eine Skalierung der Reglerparameter mit der Fahrgeschwindigkeit kompensiert. Weiters wurden systematisch zwei modellbasierte Sliding-Mode Regelalgorithmen mit unterschiedlicher Modellgenauigkeit und Online-Schätzung der aktuellen Reifenlängskraft entwickelt.

Im letzten Teil dieser Arbeit wird die erzielbare Regelgüte der vorgestellten Radschlupfregler mit Hilfe eines Gütefunktionsals verglichen. Es wurde dafür ein Bremsmanöver auf einer Fahrbahn mit zweifachem Reibwertsprung, bei dem nur die elektrisch angetriebenen Räder verzögert und auf einen festen Referenzschlupf geregelt werden, simuliert.

Modellierung und Regelung der PMSM

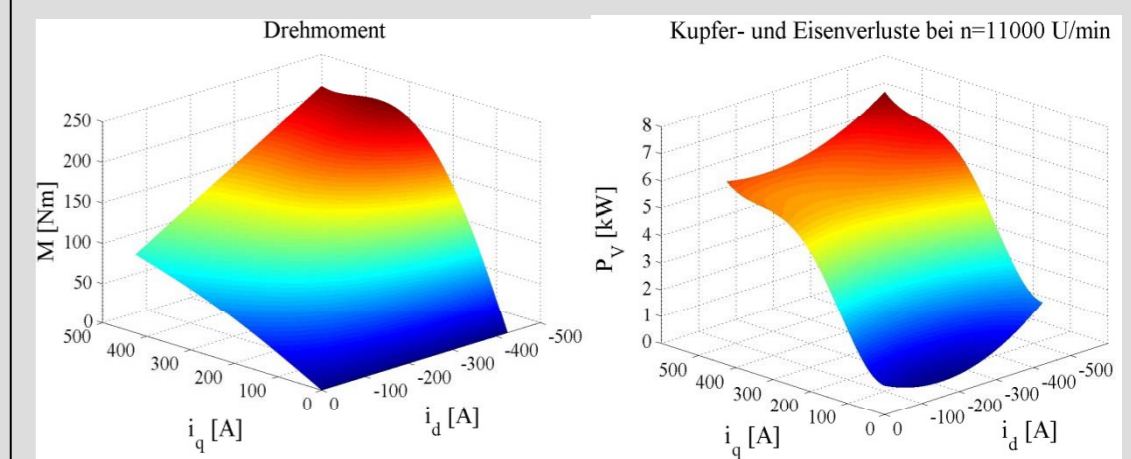
- Permanentmagnet-erregte „hybride“ Synchronmaschinen
 - zusätzliches Reluktanzmoment
 - Nennleistung: 42 kW
 - Maximalleistung: 84 kW
- Drehmoment:

$$M = \frac{3}{2} p_z \{ \psi_{PM}(i_q) i_q + [L_d(i_q) - L_q(i_q)] i_d i_q \}$$
- Verlustmodell (arbeitspunktabhängig)
 - Kupferverluste:

$$P_{Cu} = R_W(T_W) (i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t))$$
 - Eisen- u. Reibungsverluste basierend auf Messdaten:

$$P_{Fe} = \left(\frac{B}{B_{ref}} \right)^2 \cdot (a \cdot f^2 + b \cdot f)$$
 - Identifikation der Parameter a, b aus Leerlaufversuch

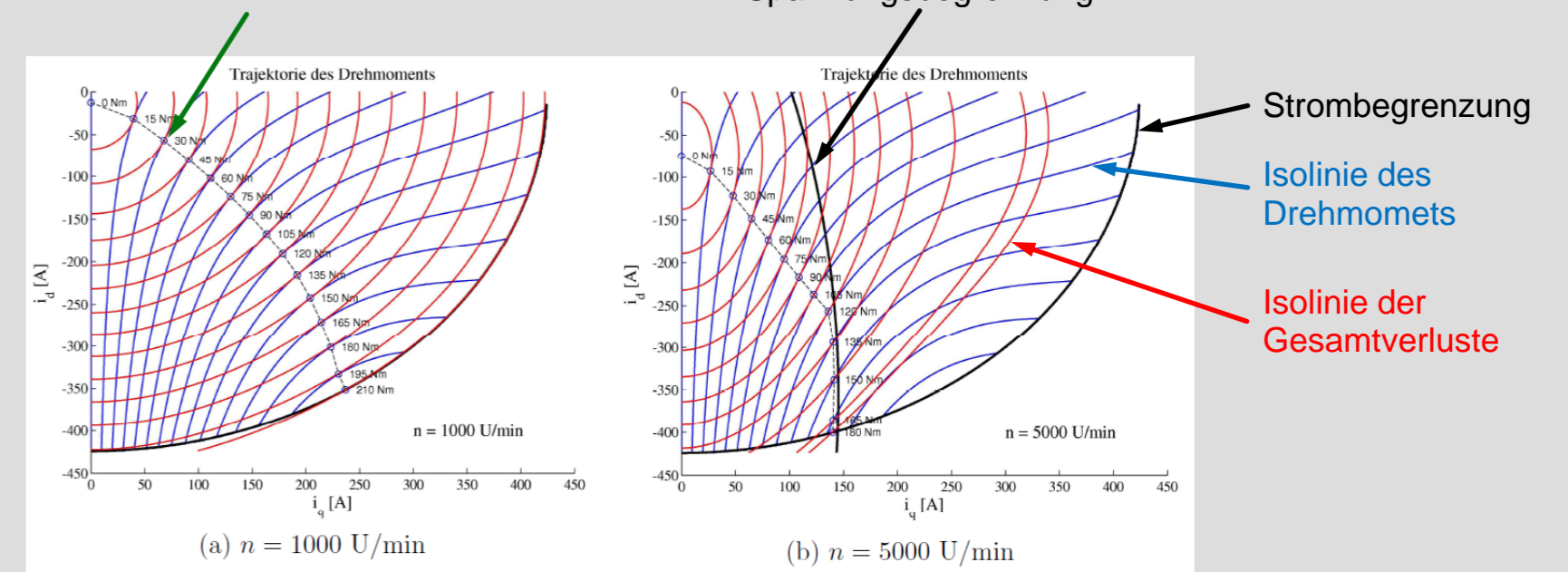
- Ziel: Momentensteuerung
 - gekoppeltes nichtlineares Mehrgrößensystem
 - Maschinenverluste



- Idee: wirkungsgradoptimale „Inversion“ der Drehmomentbeziehung
 - Berechnung von Stromkennfeldern
 - Optimierungsaufgabe mit nichtlinearen Nebenbedingungen:

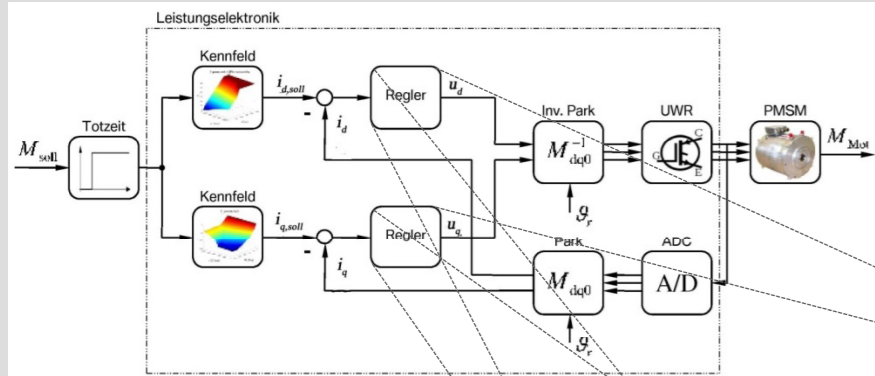
$$\min_{i_d, i_q} P_v(n, i_d, i_q) \quad \begin{cases} M(i_d, i_q) = M_{ref} \\ |\underline{u}_s| \leq u_{max} \text{ mit } |\underline{u}_s| = \sqrt{u_d^2 + u_q^2} \\ |\underline{i}_s| \leq i_{max} \text{ mit } |\underline{i}_s| = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \end{cases}$$

verlustoptimaler AP für $M=30 \text{ Nm}$ @ $n=1000 \text{ U/min}$



Stromregelung

- Stromkennfelder + nachgeschaltete Stromregler:



- Stromregler mit conditional feedback

- Führungsübertragungsfunktion: $G_x^*(s)$
- Wahl von A(s): $G_x^*(s) = A(s) \cdot G_S(s)$
- Wahl des Vorfilters B(s): $B(s) = A(s) \cdot G_S(s)$

Regelung des Radschlupfs

- Prämissen:
 - reine Fahrzeuglängsdynamik
 - v_x steht als Messsignal zur Verfügung
 - HA-Bremung mit E-Motoren

Zielgröße: λ_B $\lambda_B = \frac{r \cdot \omega_{Rad} - v_x}{v_x}$

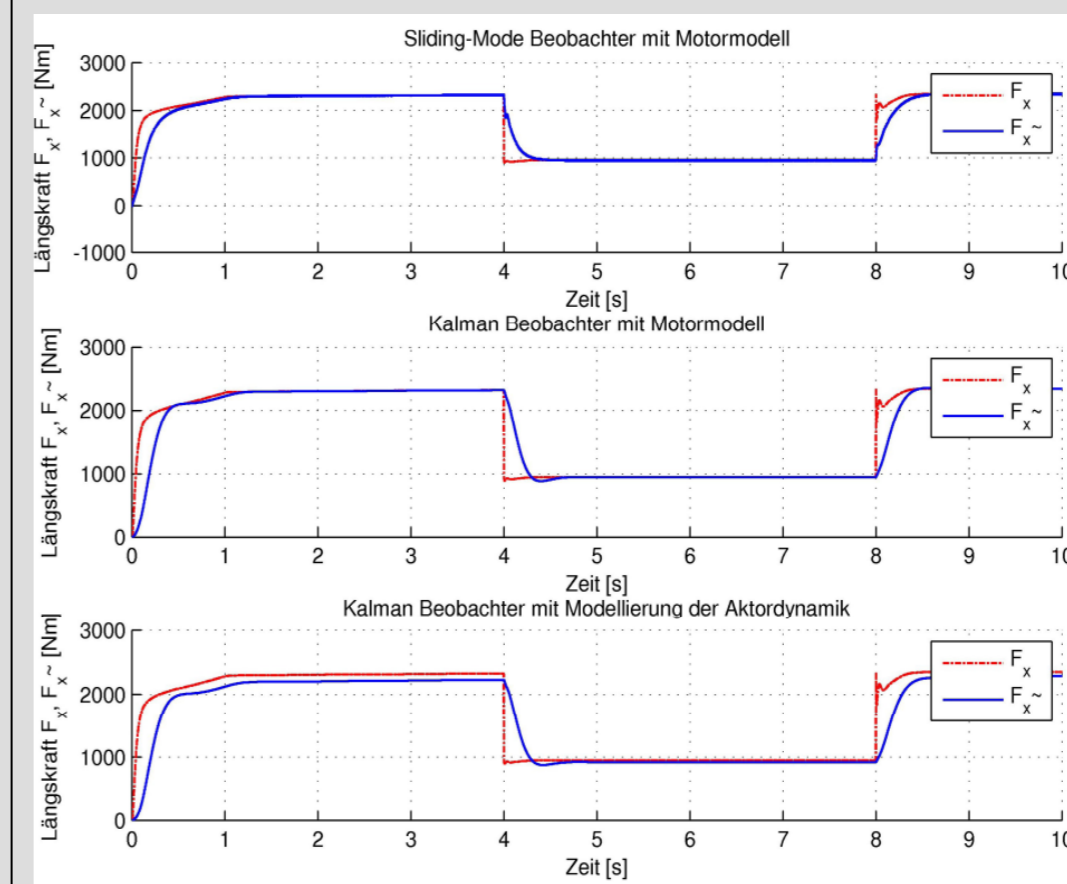
Schlupfdynamik des „Viertelfahrzeugs“: $\dot{\lambda}_B = \frac{1}{v_x} \left[\frac{r^2}{J} F_x + \frac{1}{m} (1 + \lambda_B) \sum_{i=1}^4 F_{x,i}(\lambda_i) - \frac{r}{J} M_B(t) \right]$

Aktordynamik: $\dot{M}_B(t) \cdot T_M + M_B(t) = i_{ges} \cdot u$

- Schätzung der Reifenlängskraft: \hat{F}_x
 - Kalman-Filter
 - Sliding-Mode Beobachter

Schätzung der Reifenlängskraft

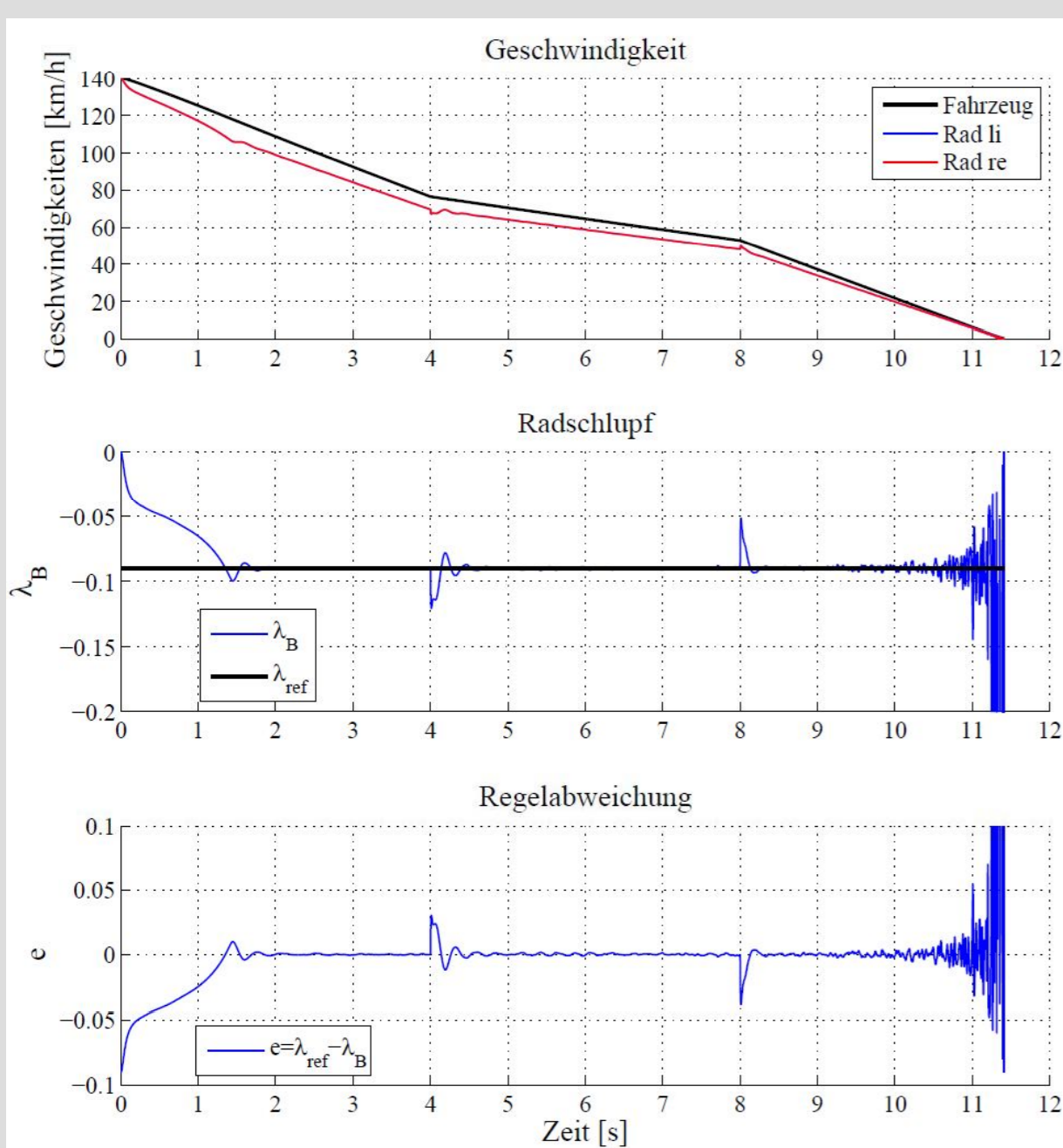
- Bremsmanöver mit 2-fachem Reibwertsprung



- Sliding-Mode Beobachter:
 - (global $\rightarrow J_{F_x} = 100 \%$)
 - (stationär $\rightarrow J_{F_x} = 100 \%$)
- Kalman Filter mit externem Motormodell:
 - (global $\rightarrow J_{F_x} = 111 \%$)
 - (stationär $\rightarrow J_{F_x} = 3,4 \%$)
- Kalman Filter mit Modellierung der Aktordynamik:
 - (global $\rightarrow J_{F_x} = 146 \%$)
 - (stationär $\rightarrow J_{F_x} = 400 \%$)

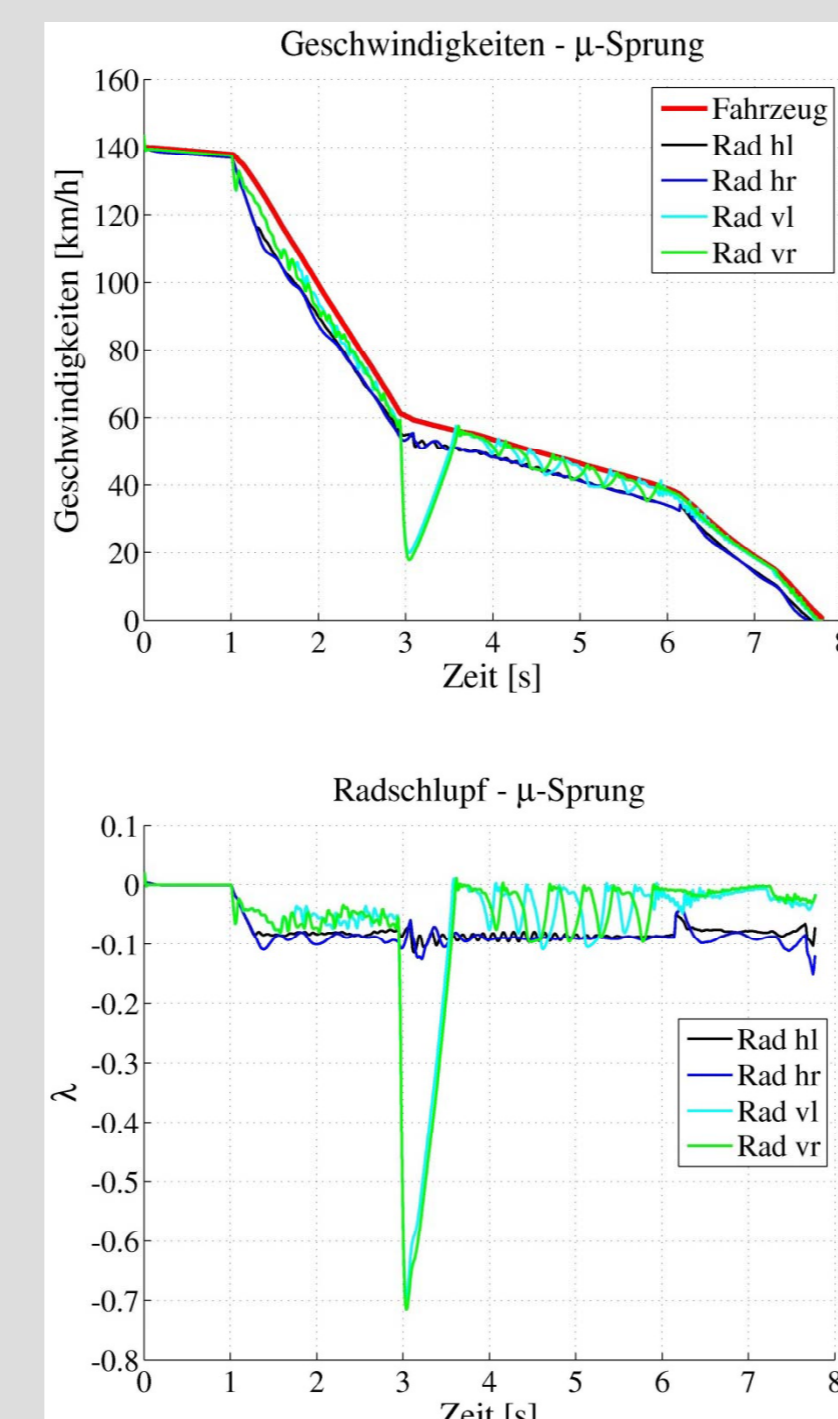
Simulationsergebnisse der Radschlupfregelung an der HA

- Sliding-Mode Radschlupfregelung an den HR mit 2-fachem Reibwertsprung



Serien-ABS an der VA und Radschlupfregelung an der HA

- Vollbremsmanöver mit 2-fachem Reibwertsprung



Vorderräder: konventionelle Reibbremsen mit Serien-ABS
Hinterräder: E-Motoren mit Sliding-Mode Schlupfregelung

Schlussfolgerung und Ausblick

- Regelung der nichtlinearen PMSM
 - Wirkungsgradoptimale Bestromungskennfelder mit nachgeschalteten modellbasierten Stromregler erwiesen sich zur optimalen Maschinenansteuerung als zweckmäßig.
- Kontinuierliche Radschlupfregelung
 - „Brake-by-Wire“ an den Hinterrädern \Rightarrow vergleichbar mit Elektro-Mechanischer Bremse (EMB)
 - Bei leistungsstarken E-Motoren Energierekuperation bis an die Haftschlussgrenze der Reifen möglich
 - Gute Performance der Schlupfregelung trotz hohem Trägheitsmoment des Antriebsstrangs
 - Verschiedene Reglerkonzepte (PI, Gain-Scheduling PI, Sliding-Mode mit Modell 1. und 2. Ordnung) implementiert
- Schätzung der Reifenlängskraft über bekanntes Motormoment
 - Verbessert Sliding-Mode Regelung erheblich
- Potenzial für zukünftige Untersuchungen:
 - Vereinfachung des Bremssystems durch Entfall der HA-Reibbremsen + Wegfall Bremskraftverstärker
 - Bremsstrategie zur optimalen Rekuperation an der HA unter Aufrechterhaltung der Fahrstabilität
 - E-Motoren an der HA als Aktoren für Fahrdynamikregelung („echtes“ Torque Vectoring bzw. Active Yaw)
 - Geschwindigkeits- und Reibwertschätzung mit E-Motoren als „Radmoment-Sensoren“
 - Steigerung der Agilität