

Die Entwicklung der Spurführungsregelung des DLR „Next Generation Train“-Fahrwerkes auf einem skalierten Rollprüfstand und in der Mehrkörpersimulation

Dr.-Ing. Andreas Heckmann¹, Daniel Lüdicke, Gustav Grether, Alexander Keck, Dr.-Ing. Tilman Bünte
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), Institut für Systemdynamik und Regelungstechnik,
Münchener Str. 20, 82234 Weßling

{ Andreas.Heckmann | Daniel.Luedicke | Gustav.Grether | Alexander.Keck | Tilman.Buente }@DLR.de

Das DLR-interne Projekt „Next Generation Train“ (NGT) forscht an einem (virtuellen) Hochgeschwindigkeitszug für Geschwindigkeiten bis 400 km/h im Regelbetrieb. Die vorgesehenen mechatronischen Einzelradfahrwerke enthalten eine aktive Spurführungsregelung zur lateralen Positionierung des Fahrwerkes im Spurkanal.

In dem Vortrag werden die aktuellen Entwicklungen am DLR zur Spurführungsregelung von Einzelradfahrwerken zusammengefasst. Im ersten Teil wird eine neue Methode zur Identifizierung schwer messbarer Parameter am Beispiel des DLR M 1:5-Rollprüfstandes vorgestellt. Der zweite Teil des Vortrages beschäftigt sich mit verschiedenen Aspekten der robusten Spurführungsregelung. Zu Beginn wird die Zustandsreglersynthese mit dem Parameterraumverfahren vorgestellt und am 1:5 Rollprüfstand angewendet. Das Design wird anschließend auf das Fahrwerk des NGT-Mittelwagens in der SIMPACK-Mehrkörpersimulation angepasst und um die Kompensation des gyroskopischen Effektes an den Rädern bei wechselnder Überhöhung in Übergangsbögen erweitert. Der letzte Teil des Vortrages belegt die Leistungsfähigkeit des Reglers anhand von Simulationsergebnissen.

Experimentalfahrwerk auf dem DLR 1:5-Rollprüfstand

Nach einer theoretischen Reglersynthese und ersten Simulationen werden Spurführungsregler am DLR auf einem Rollprüfstand im Maßstab 1:5 untersucht. Das verwendete Experimentalfahrwerk enthält einen Fahrwerksrahmen, zwei Radträgermodule und vier einzeln angetriebene Räder.

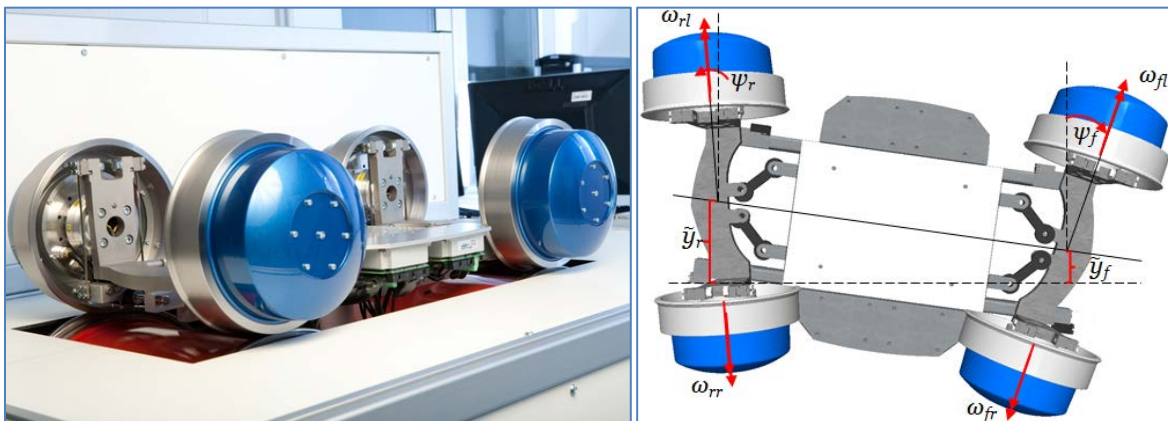


Abb. 1: Rollprüfstand mit Experimentalfahrwerk M 1:5 (links) und Draufsicht mit Freiheitsgraden (rechts)

In Abb. 1 sind die für die mechatronische Spurführung relevanten mechanischen Freiheitsgrade des Experimentalfahrwerkes dargestellt. Dies sind die laterale Verschiebung aus der Gleismitte des vorderen und hinteren Radträgers y_f bzw. y_r , sowie die Lenkwinkel der Radträger ψ_f bzw. ψ_r und die vier Winkelgeschwindigkeiten der Räder ω_{fl} , ω_{fr} , ω_{rl} und ω_{rr} .

¹ Vortragender

Mit Hilfe einer rechnergestützten Optimierung wurden schwer messbare Fahrwerks- und Prüfstandsparameter identifiziert und die zugrunde gelegte Modellierung validiert. Dies betraf insbesondere die folgenden Parameter:

- die Rotationssteifigkeit der Radträger gegenüber dem Fahrwerksrahmen
- das Übertragungsverhalten der Radmotoren
- die Parameter des Rad-Schiene-Kontaktes nach Polach [1].

Die beiden Radmotoren eines Radträgers werden so angesteuert, dass die Momente rechts und links betragsmäßig gleich, aber im Vorzeichen verschieden sind. Diese Differenzmomente τ_i , $i \in \{f, r\}$, am vorderen und hinteren Radträger wirken so als Stellgrößen.

Reglersynthese mit dem Parameterraum-Verfahren

Im Vergleich zu konventionellen Radsatzfahrwerken haben Einzelradfahrwerke keine Selbstzentrierung und eigenständiges Kurvenlenken [2]. Daraus ergibt sich für die Reglerentwicklungen von mechatronischen Einzelradfahrwerken zum einen die Aufgabe das Fahrwerk niederfrequent in die Kurve einzulenken und zum zweiten die hochfrequenten Fahrweganregungen mit einer Spurführungsregelung auszugleichen.

Die Spurführungsregelung des NGT-Fahrwerkes [3] verwendet das folgende Regelgesetz zur Bestimmung der Differenzmomente τ_i mit den Koeffizienten k_y , k_ψ und $k_{\dot{\psi}}$ als Funktion der Fahrgeschwindigkeit v_R

$$\tau_i = [k_y(v_R), k_\psi(v_R), k_{\dot{\psi}}(v_R)] \begin{bmatrix} y_i \\ \psi_i \\ \dot{\psi}_i \end{bmatrix}$$

Mithilfe des Parameterraumverfahrens [4] wird die Stabilität der Regelung über dem gesamten Geschwindigkeitsbereich nachgewiesen, wobei die äquivalente Konizität als veränderlicher, unsicherer Parameter behandelt wird. Als ein Beispiel werden in Abb. 2 links die Grenzen der stabilen Parameterbereiche des Reglers in Abhängigkeit der Fahrgeschwindigkeit dargestellt. Solange die Reglerverstärkung k_y innerhalb der stabilen Bereiche bleibt, ist der Regler gegenüber (den spezifizierten) Parameterschwankungen robust.

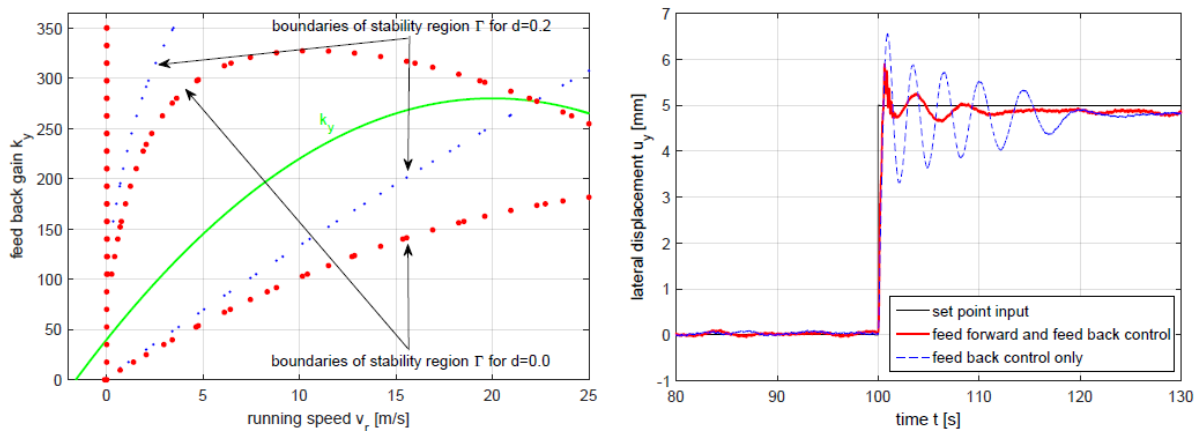


Abb. 2: Reglersynthese im Parameterraum (links) und Sprungantwort des geregelten Experimentalfahrwerkes

Der vorgestellte Spurführungsregler wird nun für die Einzelrad-Einzelfahrwerke des NGT-Mittelwagens adaptiert. Hierbei bleibt die Reglerstruktur gleich und die Reglerparameter werden auf die geänderte Geometrie und Massen angepasst, siehe [5]. Als Erweiterung zu einem immer geradeaus fahrenden Rollprüfstand werden im folgenden Abschnitt zusätzliche Effekte bei einer Kurvenfahrt berücksichtigt.

Gyroskopischer Einfluss in einer Klotoide mit Überhöhungänderung

In Übergangsbögen wird mit steigender Krümmung auch die Überhöhung angehoben um die auftretenden Fliehkräfte zu kompensieren. Bei rotierenden Rädern führt die Änderung der Überhöhung zu einem gyroskopischen Effekt, der ein Drehmoment um die Hochachse erzeugt [6]. Das gyroskopische Moment kann regelungstechnisch gesehen, als systematische Störung der Regelstrecke aufgefasst werden. Es wird durch eine zusätzliche Vorsteuerung in der Reglerstruktur kompensiert, sodass der eigentliche Spurführungsregler diesem Effekt nicht mehr entgegenwirken muss. In Abb. 3 ist in blau das Systemverhalten ohne Kompensierung und in Rot das Systemverhalten mit Kompensierung dargestellt. Der NGT-Mittelwagen fährt dabei auf einer

Hochgeschwindigkeitsstrecke bei $s=260$ m mit 400km/h aus einer Geraden in eine Klotoide mit einer Länge von 510 m ein, an deren Ende die Überhöhung 170 mm beträgt.

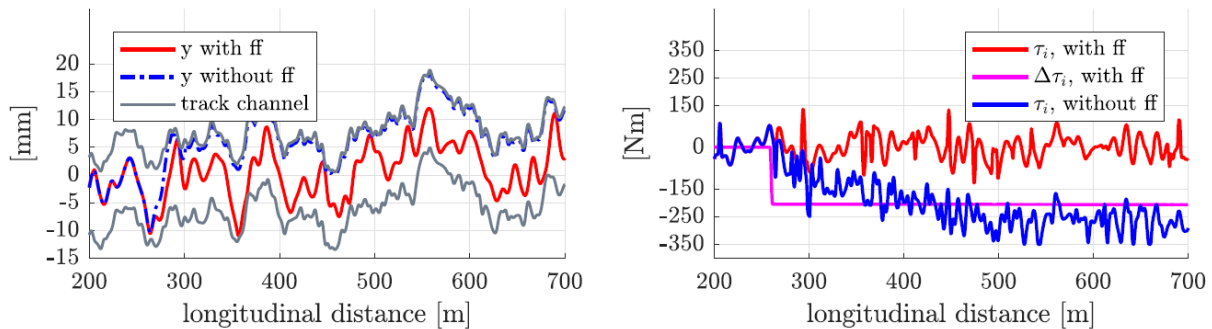


Abb. 3: Laterale Verschiebung (links) und Differenzmoment (rechts) des Spurführungsreglers ohne (Blau) und mit Vorsteuerung (Rot)

Ohne Kompensierung läuft das Radpaar in der Klotoide permanent am Spurrkranz an, so dass ein unverhältnismäßig hoher Verschleiß zu erwarten ist. Mit Kompensierung kann der Spurführungsregler das Radpaar trotz starker Fahrweganregungen in einem mittleren Bereich des Spurkanals halten.

Zusammenfassung und Ausblick

Der Vortrag erläutert die erfolgreiche Entwicklung des Spurführungsreglers für das NGT-Einzelradeinzelfahrwerk unter Verwendung zweier sich ergänzender Entwicklungsumgebungen. Sowohl die experimentelle Hardware als auch die virtuellen Mehrkörpersimulation werden auch zukünftig genutzt, um Robustheit und Zuverlässigkeit zu verbessern und das System so anwendungsnäher gestalten zu können. Die Auslegung zielt darauf ab, einen geeigneten Kompromiss im Zielkonflikt zwischen möglicher Verschleißreduktion und Leistungs- bzw. Energieeinsatz der Aktuatorik zu finden. Die Schätzung von Gleislagefehlern im vorausfahrenden Fahrwerk und die Nutzung dieser Information in den folgenden Fahrwerken im Zugverband stellt eine weitere wissenschaftliche Herausforderung der Zukunft dar.

Literaturverzeichnis

- [1] O. Polach, "Creep forces in simulations of traction vehicles running on adhesion limit," *Wear*, vol. 258, no. 7, pp. 992-1000, 2005, Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems.
- [2] R. M. Goodall, S. Bruni, and T. X. Mei, "Concepts and prospects for actively controlled railway running gear," *Vehicle System Dynamics*, vol. 44, no. sup1, pp. 60-70, 2006.
- [3] A. Heckmann, D. Lüdicke, G. Grether, and A. Keck, "From Scaled Experiments of Mechatronic Guidance to Multibody Simulations of DLR's Next Generation Train Set," *Proceedings of the 25th International Symposium on Dynamics of Vehicles on Roads and Tracks*, 2017.
- [4] J. Ackermann, A. Bartlett, D. Kaesbauer, W. Sienel, and R. Steinhauser, *Robust Control: Systems with Uncertain Physical Parameters*. Secaucus, NJ, USA: Springer-Verlag New York, Inc., 2001.
- [5] D. Krüger, M. Rehermann, J. König, J. Winter, and H. E. Friedrich, "Next Generation Train Fahrwerk: Eine neuartige Methode für die Leichtbauoptimierung von Schienenfahrzeugfahrwerksstrukturen," *ZEVrail*, vol. 141, pp. 242-249, Juni 2017.
- [6] B. Kurzeck, A. Heckmann, C. Wessler, and M. Rapp, "Mechatronic track guidance on disturbed track: the trade-off between actuator performance and wheel wear," *Vehicle System Dynamics*, vol. 52, no. sup1, pp. 109-124, Juni 2014.