

DIRK SÖFFKER, PETER HOFFMANN, PETER C. MÜLLER

## Verfahren zur Bestimmung der Kontaktkräfte im Rad - Schiene Kontakt elektrischer Triebfahrzeuge

In diesem Beitrag wird die Anwendung eines Proportional - Integral Beobachters zur Bestimmung der nichtmeßbaren Kontaktkräfte im Rad - Schiene Kontakt vorgestellt. Auf Basis einer von Groß - Thebing und Knothe entwickelten Kontaktmodellbeschreibung wurden Simulationsrechnungen durchgeführt, welche die Brauchbarkeit eines derartigen Ansatzes im Einsatzfeld belegen.

### 1. Motivation

Die Entwicklungsziele elektrischer Hochleistungstriebfahrzeuge mit Drehstrom - Asynchronmotoren beinhalten eine bessere Ausnutzung des Kraftschlußpotentials im Rad - Schiene Kontakt. Die von technischer Seite gestellten Anforderungen beinhalten dabei neben den klassischen sicherheitstechnischen Betrachtungen zur Stabilität des Rad - Schiene Kontaktes während des Laufes, neben dem Beherrschen verschiedenster Betriebssituationen auch Forderungen nach einer Verschleißoptimierung von Rad und Schiene.

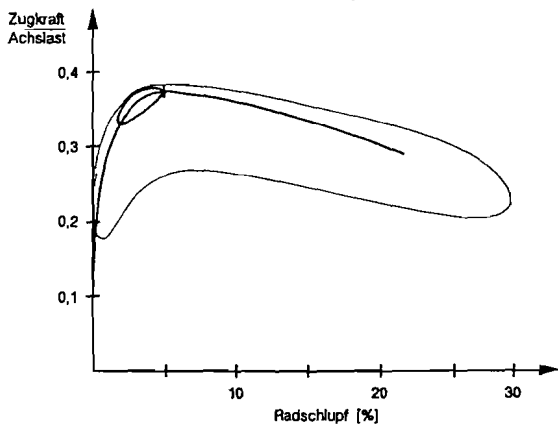


Abb. 1: Optimaler Arbeitsbereich des Rad - Schiene Kraftschlußpotentials

Aufbauend auf den zahlreichen Arbeiten und Beschreibungen zur Kontaktmechanik der vergangenen Jahre, vgl. z.B. [1,2,3], müssen regelungstechnische Verfahren zur Antriebsregelung zum Einsatz kommen. Die sich in der Praxis befindlichen Regler sowie pragmatische Konzeptionen sind in [4] wiedergegeben. Die positiven Erfahrungen mit dem in [5] im Detail beschriebenen Proportional - Integral Beobachter (PI-Beobachter) bei der Schadendiagnose großer elastischer mechanischer Strukturen [6,7] führten zur Konzeption einer Kraftschlußregelung, in welcher der Bestimmung der stark nichtlinearen Kontaktkraft eine zentrale Bedeutung zukommt. Aufbauend auf der Schätzung der Kontaktkräfte und der Bestimmung des aktuellen Schlupfzustandes kann mit Hilfe einer entsprechenden Drehmomentregelung des Antriebsmotors das aktuelle Kraftschlußpotential (Abb. 1.) entsprechend der aktuellen Betriebssituation bestimmt und gegebenenfalls korrigiert werden.

### 2. Rad - Schiene Kontakt- und Antriebsmechanik

Der in Abb. 2 gezeigte Radsatz läßt sich im wesentlichen durch

$$\ddot{\varphi}_M + \frac{d_{MW}}{\Theta_M}(\dot{\varphi}_M - \dot{\varphi}_W) + \frac{c_{MW}}{\Theta_M}(\varphi_M - \varphi_W) = M(t), \quad \ddot{\varphi}_W + \frac{d_{MW}}{\Theta_M}(\dot{\varphi}_W - \dot{\varphi}_M) + \frac{c_{MW}}{\Theta_M}(\varphi_W - \varphi_M) = \frac{2rT_\xi}{\Theta_W} \quad (1)$$

$$\ddot{u}_{wx} + \frac{2d_w}{m_w}\dot{u}_x + \frac{2c_w}{m_w}u_x = \frac{2T_\xi}{m_w} \quad \ddot{u}_{wz} + \frac{2d_w}{m_w}\dot{u}_z + \frac{2c_w}{m_w}u_z = \frac{2N}{m_w} - g \quad (2)$$

beschreiben. Hierbei sind die mechanischen Parameter  $d_{MW}$ ,  $c_{MW}$ ,  $d_w$ ,  $c_w$ ,  $r$ ,  $\Theta_M$ ,  $m_w$ ,  $r$  gegeben,  $\varphi_M$ ,  $\varphi_W$ ,  $u_x$ ,  $u_z$  stellen den Motorwinkel, den Radsatzwinkel, die Horizontal- und Vertikalverschiebung des Radsatzes dar. Die vollständige Beschreibung umfaßt zusätzliche Gleichungen für die Gleisnachgiebigkeit  $u_{g1,2}$  und die Wank- und Wendebewegung des Radsatzes im Gleis. Die von der Eindringtiefe  $d$  des Rades in der Schiene abhängige Radlast  $N$ ,  $\dot{N}$  koppelt die Radsatzdynamik mit der Gleisdynamik. Die für die Simulation notwendigen Zusammenhänge der Kalker'schen Kontaktmechanik werden hier nur für den Tangentialkontakt betrachtet. Für die Kontaktkraft  $T_\xi$  gilt

$$T_\xi = \alpha T_\xi^{lin.} = -\alpha abGC_{11}\nu_\xi. \quad (3)$$

mit aus der Kontakttheorie bekannten Koeffizienten. Für  $\alpha$  gilt nach der vereinfachten Theorie Kalkers

$$\alpha = 1 - \frac{1}{3} \left( \frac{T_\xi^{lin.}}{\mu N} \right) + \frac{1}{27} \left( \frac{T_\xi^{lin.}}{\mu N} \right)^2 \quad \text{für } T_\xi^{lin.} \geq 3\mu N \quad \text{bzw.} \quad \alpha = \frac{\mu N}{T_\xi^{lin.}} \quad \text{für } T_\xi^{lin.} < 3\mu N. \quad (4)$$

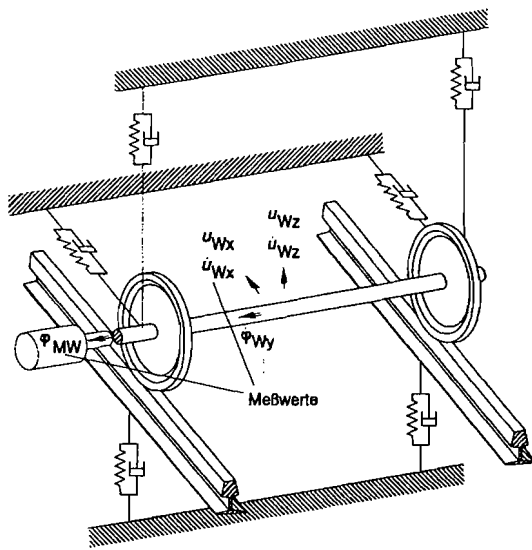
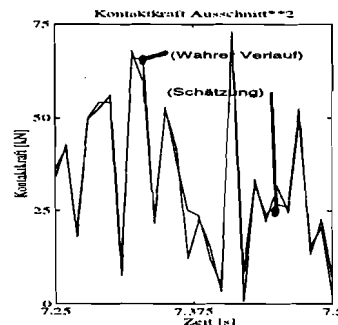
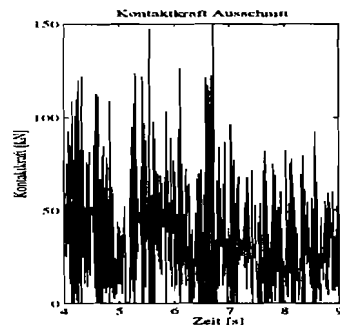


Abb. 2: Vereinfachtes Modell eines angetriebenen, federnd gelagerten Radsatzes

#### 4. Simulationsergebnisse

Die nachfolgenden Darstellungen beinhalten beispielhaft die Schätzung der Kontaktkraft im Rad - Schiene Kontakt bei ausschließlicher Messung von  $\varphi_w$  während eines Anfahrmanövers. Die Ergebnisse zeigen (erwartungsgemäß), daß der PI-Beobachter sich zur Schätzung von nichtmeßbaren Kontaktkräften verwenden läßt. Die nächsten Arbeitsschritte beinhalten neben dem Entwurf einer Regelung die Berücksichtigung einer komplexeren Radsatzdynamik.



#### 5. References

- 1 Knothe, K.: Lateraldynamik von Schienenfahrzeugen. Vorlesungsskript TU Berlin, Wintersemester 1992 / 93.
- 2 Kalker, J.J.: Three - Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact. Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, Boston, London, 1990.
- 3 Lange, M.; Groß-Thebing, A.; Stiebler, M.; Knothe, K.: Simulationsmodell für Vollbahn - Antriebssysteme zur Untersuchung der ausnutzbaren Zugkraft. Arbeitsbericht zum DFG-Forschungsvorhaben Kn/St 132/20, 1993 bis 1995.
- 4 Stiebler, M.; Knothe, K.; Dreimann, K.: (Hrsg.): Tagungsband des Workshops 'Simulation und Praxis der Kraftschlußausnutzung von Hochleistungs - Triebfahrzeugen. Berlin, 27./28. Juni 1996.
- 5 Söffker, D.; Yu, T.J., Müller, P.C.: State Estimation of Dynamical Systems with Nonlinearities by using Proportional - Integral Observer. International Journal of System Science. Vol. 26 (1995), No. 9, pp. 1571-1582.
- 6 Söffker, D.; Bajkowski, J.; Müller, P.C.: Crack Detection in Turbo Rotors - A New Observer - Based Method. ASME Journal of Dynamic Systems, Measurements, and Control, 3, 1993, pp. 518 - 524.
- 7 Söffker, D.: A New Model - Based Tool for Failure Detection and Isolation in Machine- and Rotordynamics. Proc. ASME 12th RSAPF Conf., Sept. 1995, Boston, USA.

Adresse: Dirk Söffker, Peter Hoffmann, Peter C. Müller Sicherheitstechnische Regelungs- und Meßtechnik, Bergische Universität - Gesamthochschule Wuppertal, D-42097 Wuppertal, Bundesrepublik Deutschland.

Zentral ist die Berechnung des Schlupfes. Die den Simulationen hier zugrundeliegende Berechnung des Schlupfes ist

$$\nu = 1 - \frac{\dot{u}_x}{v} - \frac{r\varphi_w}{v} \quad (5)$$

mit der Absolutgeschwindigkeit  $v$ . Auf Grund der Fallunterscheidung in (4) ergibt sich eine stark nichtlineare Charakteristik der additiv auf das Antriebssystem einwirkenden Kontaktkraft. Als zusätzliche Anregung wird die stochastische Anregung des Querhöhenfehlers  $\Delta z$  angenommen. Über die algebraische Beziehung

$$d = u_{g1} + u_{g2} - u_{wz} + \Delta z \quad (6)$$

sowie einer Beziehung für die Eindringtiefe  $d$  des Hertschen Kontaktes (z.B. aus [1]) ergibt sich eine für Prinzipuntersuchungen ausreichende Komplexität des Gesamtsystems.

#### 3. PI - Beobachter

Die Aufgabe des PI - Beobachters besteht in der Rekonstruktion der nichtmeßbaren Kontaktkraft aus den vorhandenen Messungen von  $\varphi_w$  bzw.  $u_x$  während des Betriebes.

Die Darstellung, Entwicklung und Anwendung des PI-Beobachters findet sich in [6,7]. Da der Beobachter mit keinerlei Annahmen hinsichtlich des Charakters der Nichtlinearität arbeitet, läßt er sich hier sehr leicht anwenden.