

# Einfluß stochastischer Erregungen auf das Verhalten der Querdynamik eines Eisenbahnratsches

Martin Cichon\*<sup>1</sup> and Walter Wedig\*\*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universität Karlsruhe, Institut für Technische Mechanik, D-76131 Karlsruhe

Der Eisenbahnratsch spielt in der Systemdynamik der Eisenbahnfahrzeuge aufgrund seiner außerordentlich hohen Beanspruchung und seiner absoluten Sicherheitsrelevanz die zentrale Rolle. Als passives Bauelement sorgt er für das Tragen, Führen und Antreiben bzw. Bremsen des Fahrzeugs. Die Querdynamik beschäftigt sich mit dem Führen des Ratsches im Gleis innerhalb des vorgegebenen Spurspiels.

Wie alle technischen Gebilde ist auch das Gleis und der Ratsch nicht frei von Abweichungen zu einem definierten Sollzustand. Das hinsichtlich der Querdynamik in Betracht gezogene vereinfachte Modell berücksichtigt lediglich Gleislagefehler und hierbei zunächst nur den Gleisquerlagefehler.

Für ein stark vereinfachtes Modell zur Untersuchung der Radprofilpaarung unter dem Einfluß einer weißen Rauschregung ist das invariante Maß durch Lösung der zugehörigen FOKKER-PLANCK-KOLMOGOROW-Gleichung analytisch geschlossen angebar. Mittels Monte-Carlo Simulationen läßt sich das Querdynamikverhalten komplizierterer Systeme und der Realität angepaßter Anregungen besser untersuchen. Zur Anregung werden Filter benötigt, die Trajektorien mit gleichen statistischen Eigenschaften erzeugen, wie sie bei realen Gleisen auftreten.

Die gewonnenen Ergebnisse werden diskutiert und mit Messungen verglichen.

© 2004 WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim

## 1 Modell

Um die Charakteristik der Querdynamik eines Eisenbahnratsches zu untersuchen wurde vom Einfluß fahrzeugspezifischer Parameter und der besonderen nichtlinearen Kontaktkinematik des Ratsches auf einem beliebig profilierten Gleis abgesehen, so daß das im folgenden definierte Ratschmodell den Untersuchungen zugrunde gelegt wurde:

- Die Radprofile des rechten und linken Rades sind zueinander symmetrisch
- Die Lage der Berührungskontaktflächen ist durch die Querauslenkung des Ratsches gegenüber dem Gleis und durch das Radprofil bestimmt (Schneidenlagerung)
- Die Kontaktkräfte werden nach der linearen Theorie von KALKER für einen antriebslosen Ratsch ermittelt
- Es wird konstante Radnormkraft vorausgesetzt
- Symmetrische Fesselung mittels linearer Federelemente an ein im Soll-Kurs mitbewegtes Referenzsystem (Sky-Hook Prinzip)
- Bezüglich der Gleislagefehler werden lediglich Querlagefehler betrachtet
- Der Einfluß einer stochastischen Querkraft beispielsweise aus Seitenwind oder aus aerodynamischen Turbulenzen wird berücksichtigt.

Bezüglich der durch die symmetrischen Radprofile und die Radnormkräfte hervorgerufenen Profilsitenkräfte wird nach BRANN [1] eine ungerade Funktion

$$F_q = \sum_{i=0}^n \alpha_i y^{2i+1}, \quad n \in \mathbf{N}, \alpha_i \text{ profilpaarungsabhängig} \quad (1)$$

zur Beschreibung herangezogen.

Mit den hieraus für Gleisquerlagefehler abgeleiteten Profilsitenkräften  $\mathbf{F}_t$  und mit den linearisierten Bewegungsgleichungen für den Eisenbahnratsch aus [2] ergibt sich unter Beachtung des stochastischen Gleisquerlagefehlers  $Y_t$  und einer stochastischen Querkraft  $\mathbf{P}_t$  die im folgenden verwendete Bewegungsgleichung

$$\begin{pmatrix} m & 0 \\ 0 & J_3 \end{pmatrix} \ddot{\mathbf{q}} + \begin{pmatrix} 2 \frac{f_{22}}{v_0} & 2 \frac{f_{23}}{v_0} - J_2 \frac{\delta_0 v_0}{a r_0} \\ -2 \frac{f_{23}}{v_0} + J_2 \frac{\delta_0 v_0}{a r_0} & 2 \frac{a^2 f_{11} + f_{33}}{v_0} \end{pmatrix} \dot{\mathbf{q}} + \begin{pmatrix} 2 \frac{a_0 \delta_0}{r_0} + 2c_y & -2f_{22} \\ 2 \frac{f_{11} a \delta_0}{r_0} & 2f_{23} + 2c_x L^2 \end{pmatrix} \mathbf{q} + \mathbf{F}_t = \mathbf{F}_{Y_t} + \mathbf{P}_t \quad (2)$$

\* Corresponding author: e-mail: cichon@itm.uni-karlsruhe.de

\*\* e-mail: wedig@itm.uni-karlsruhe.de

mit

$$\mathbf{F}_t = \begin{pmatrix} \alpha_1(y - Y_t)^3 + \alpha_2(y - Y_t)^5 \\ 0 \end{pmatrix}, \mathbf{P}_t = \begin{pmatrix} \sigma_y P_{t1} \\ \sigma_\psi P_{t2} \end{pmatrix} \text{ und}$$

$$\mathbf{F}_{Y_t} = \begin{pmatrix} 2 \frac{f_{22}}{v_0} \\ -2 \frac{f_{23}}{v_0} + J_2 \frac{\delta_0 v_0}{a r_0} \end{pmatrix} \dot{Y}_t + \begin{pmatrix} 2 \frac{g_0 \delta_0}{a} \\ 2 \frac{f_{11} a \delta_0}{r_0} \end{pmatrix} Y_t, \mathbf{q} = \begin{pmatrix} y \\ \psi \end{pmatrix}.$$

## 2 Stochastische Anregung

Zur Simulation der Gleisquerlagefehler und der stochastischen Kraftanregung wird ein eindimensionaler GAUSS-scher weißer Rauschprozeß  $\xi_t$  als Zeitableitung des WIENER-Prozesses in der Regel durch Formfiltergleichungen in einen stochastischen Prozeß mit gewünschten spektralen Eigenschaften überführt oder aber lediglich auf einfache Weise in der Amplitude begrenzt, wie es für die Querkraftanregung durchgeführt wurde.

Das vollständige eindimensionale Filter für den Gleisquerlagefehler  $Y_t$  wird über einen Zwischenprozeß  $Z_s$  zunächst im Wegbereich durch die beiden Gleichungen

$$Y_s = \sum_{i=0}^{n-1} b_i \frac{d^i Z_s}{ds^i}, \quad \sum_{i=0}^n a_i \frac{d^i Z_s}{ds^i} = \xi_s \quad (3)$$

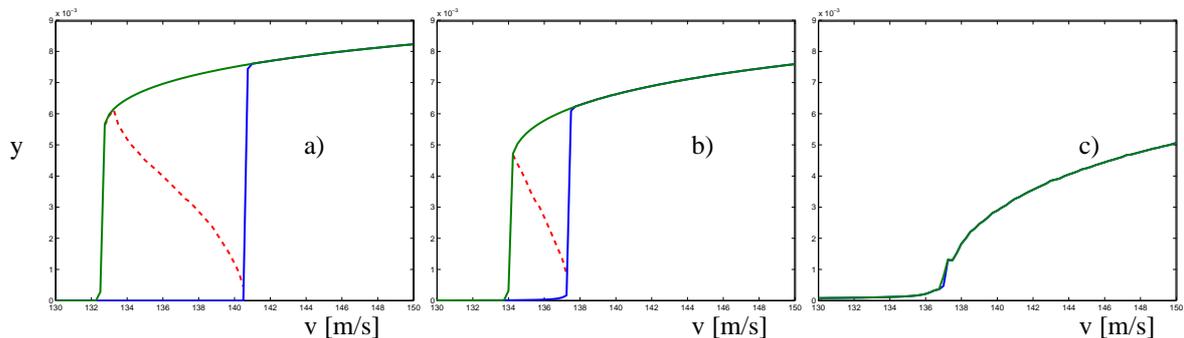
formuliert. Die Systemparameter  $a_i$  und  $b_i$  sind nach [3] derart zu bestimmen, daß das Leistungsdichtespektrum

$$S_y(\omega) = \frac{b_0^2 + (b_1^2 - 2b_0b_2)\omega^2 + \dots + b_{n-1}^2\omega^{2n-2}}{a_0^2 + (a_1^2 - 2a_0a_2)\omega^2 + \dots + a_n^2\omega^{2n}} \quad (4)$$

ein vorgegebenes Spektrum genügend annähert. Reale Leistungsdichtespektren von Gleisquerlagefehlern sind bspw. in [4] zu finden. Nach Rücktransformation in den Zeitbereich steht der Prozeß  $Y_t$  für die Monte-Carlo Simulation zur Verfügung.

## 3 Ergebnisse

Für einen realitätsnahen Parametersatz erhält man beispielsweise die Effektivwerte der Querauslenkung (Fig. 1). Für verschwindende Rauschanregung (a) ist das Verhalten aus verschiedenen Veröffentlichungen bekannt. Eine leichte Rauschanregung der Gleisquerlage bewirkt, daß die lineare kritische Geschwindigkeit stark abfällt (b), d.h. daß die HOPF-Bifurkation schon bei niedrigerer Geschwindigkeit eintritt. Eine weitere Steigerung der Rauschintensität bewirkt ein Verschmelzen von linearer und nichtlinearer kritischer Geschwindigkeit, wobei die Querauslenkungsamplitude allmählich schon bei geringeren Geschwindigkeiten ansteigt. Der blaue Ast kennzeichnet das Verhalten bei ansteigender Geschwindigkeit, der grüne Ast bei abfallender Geschwindigkeit. Die stochastische Separatrix, die durch Iteration der Anfangsauslenkung ermittelt wurde, ist rot strichliert dargestellt.



**Fig. 1** Effektivwerte (RMS) der Querauslenkung des Radsatzes

## References

- [1] R.P. Brann, *J. Sound Vib.* **4** (1966), S. 18-32.
- [2] K. Popp und W. Schiehlen, *Fahrzeugdynamik*, Teubner, Stuttgart, 1993.
- [3] W. Wedig, in: *The Road-Vehicle-System and Related Mathematics*, edited by H. Neunzert, Teubner, Stuttgart, 1985, S. 212-230.
- [4] F. Frederich, *ZEV-Glas. Ann.* **108** (1984), S. 355-362.