



Doctoral Thesis

Curve Squealing Mechanism of Railway Vehicles

Author(s):

Cataldi Spinola, Eric

Publication Date:

2007

Permanent Link:

<https://doi.org/10.3929/ethz-a-005595359> →

Rights / License:

[In Copyright - Non-Commercial Use Permitted](#) →

This page was generated automatically upon download from the [ETH Zurich Research Collection](#). For more information please consult the [Terms of use](#).

Diss. ETH No. 17453

CURVE SQUEALING MECHANISM OF RAILWAY VEHICLES

A dissertation submitted to
ETH ZURICH
for the degree of
Doctor of Sciences ETH Zurich

presented by
ERIC CATALDI SPINOLA
Aerospaziale Engineer, Politecnico di Milano

born May 17, 1973
citizen of Lugano, Switzerland

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Ch. Glocker, examiner
Prof. Dr. J. Dual, co-examiner
Dr. O. Polach, co-examiner

2007

Abstract

Curve squealing occurs when railway vehicles run through tight curves and it is characterised by a narrow-banded, loud noise emission. This kind of noise emission is particularly disturbing for inhabitants living nearby such curves and also for the passengers sitting on the train. With the aim of better understanding the curve squealing phenomenon the Swiss Federal Railways have started cooperating with the Center of Mechanics of the Swiss Federal Institute of Technology in Zurich. Within the framework of this cooperation two PhD theses have been contemporaneously written. One PhD thesis has focused on the experimental characterisation of this phenomenon and the acoustical simulation of the wheel, while the PhD thesis presented here deals with the modeling of the curve squealing mechanism.

In order to better understand and describe the friction-induced vibration which causes the curve squealing phenomenon, a new approach has been followed. Modelling the wheel with the Finite Element Method enables the evolution of its eigenforms as a function of its diameter to be studied. Some eigenforms are very sensitive to changes in the wheel diameter and their associated natural frequencies undergo changes of up to 300-500 Hz. These results are validated by measurements in the laboratory as well as on a mounted wheel. This means that during the operating life of the wheel very different modal characteristics are present and it is shown how this influences the occurrence of curve squealing. Furthermore, the modal damping coefficients are measured. Another important aspect which is considered is the dynamics of the railway vehicle running through the curve. A Multibody Model of a vehicle observed in the parallel PhD work is set up. It is used for determining the quasi-static forces acting on the wheel as well as the geometrical positions of the wheels with respect to the rails. These positions are confirmed by the measurements carried out in the other PhD work. Considering various wheels is important because not all wheels squeal and the model used for investigating the curve squealing mech-

anism needs to be able to reproduce both cases: squealing and non-squealing wheels. The main innovation presented in this work consists in the way the contact between the wheel and the rail is described when simulating the self-excitation mechanism causing curve squealing. Here the last results obtained in research on the field of the non-smooth dynamics are implemented. The contact between wheel and rail is considered as being a unilateral constraint with Coulomb-friction. The formulation used is kept as general as possible, even allowing for the presence of impacts. The force elements used for the normal and tangential forces have a set-valued characteristic. Therefore, in order to solve the equations of motion, a numerical method such as time-stepping is implemented, and to solve the impact problem the Augmented Lagrangian procedure is used. A pure Coulomb frictional law, with a single friction coefficient for both sticking and sliding, may be used because the dynamics of the wheel are determined by its modal decomposition and therefore the normal contact force is not constant but depends on a state variable of the system (the modal weights). Therefore, even self-excitation may take place. Furthermore, the study of the equilibrium stability of the steady-state sliding condition is considered. This enables configurations to be found out by which the system becomes unstable without needing to integrate numerically to determine if the system presents self-excitation. In this work the origin of curve squealing is attributed to a Hopf bifurcation of the steady-state sliding equilibrium leading to limit cycle characterized by a short-sticking and sliding at the contact between the wheel and the rail. Finally, the modes which are involved in curve squealing are identified.

This work presents a new approach to the understanding and modeling of the curve squealing mechanism. Of particular importance is the coupling of the tangential forces with the normal force in order to obtain self-excitation. Moreover, the stability analysis allows the parametric study of a wide range of variable values in order to find out which configurations of the wheel-rail system may lead to curve squealing or not.

Zusammenfassung

Kurvenkreischen tritt auf, wenn Schienenfahrzeuge durch enge Kurven fahren. Diese Lärmemission ist durch ein engbandiges Spektrum und einen hohen Pegel gekennzeichnet. Diese Art von Lärm wird von den Bewohnern in der Nähe solcher Kurven und von den Zugpassagieren als sehr störend empfunden. Um das Kurvenkreischen-Phänomen besser zu verstehen, wurde eine Kooperation zwischen der Schweizerischen Bundesbahn und dem Zentrum für Mechanik der ETH Zürich gestartet. In Rahmen dieser Zusammenarbeit wurden zwei Doktoraten gleichzeitig durchgeführt. Eine Doktorarbeit hat sich mit experimentellen Untersuchungen des Kurvenkreischens sowie mit der akustischen Modellierung eines Rades befasst. Die andere, die nachfolgend beschrieben wird, hat den Mechanismus, der das Kurvenkreischen verursacht, untersucht und modelliert.

Es wurde ein neues Simulationsvorgehen verwendet, um die durch Reibung erzeugten Schwingungen, die das Kurvenkreischen verursachen, besser zu verstehen und modellieren. Durch die Anwendung der Methode der Finiten Elemente für die Modellierung des Rades ist es möglich, seine modalen Eigenschaften zu bestimmen und den Einfluss seines Durchmessers auf die Eigenfrequenzen zu untersuchen. Es wurde nachgewiesen, dass einige Eigenfrequenzen sehr durchmesserabhängig sind. In den Eigenfrequenzen sind Unterschiede bis auf 300-500 Hz möglich. Diese numerischen Resultate wurden durch Messungen im Labor und im eingebauten Zustand bestätigt. Dies bedeutet, dass die modalen Eigenschaften eines Rades während seiner Einsatzdauer sehr stark variieren können. Ihr Einfluss auf das Auftreten vom Kurvenkreischen wurde gezeigt. Des Weiteren wurden auch die modalen Dämpfungskoeffizienten durch Messungen bestimmt. Ein weiterer wichtiger Aspekt, der berücksichtigt wurde, ist die Dynamik des Schienenfahrzeugs in der Kurve. Ein Mehrkörper-Modell des untersuchten Fahrzeugs wurde gebaut. Er wurde verwendet, um die in der Kurve auftretenden quasi-statischen Kräfte sowie die Lage der Räder gegenüber

der Schiene zu bestimmen. Die berechneten Positionen wurden durch die Messresultate der anderen Doktorarbeit bestätigt. Es ist wichtig, mehrere Räder zu betrachten, weil nicht alle Räder eines Fahrzeugs kreihschen. Die zur Untersuchung des Kurvenkreischen-Phänomens verwendete Modellierung muss in der Lage sein, sowohl kreihschende als auch nicht kreihschende Räder nachzubilden. Die größte Innovation dieser Arbeit besteht in der Art und Weise, wie der Kontakt zwischen Rad und Schiene bei der Modellierung des selbsterregten Mechanismus, der das Kurvenkreischen verursacht, beschrieben wird. Dabei wurden die modernen Kenntnisse der Forschung in der nicht-linearen Mechanik umgesetzt. Der Kontakt zwischen Rad und Schiene wird als eine einseitige Bindung mit Coulomb-Reibung beschrieben. Die verwendete Formulierung wurde so generell wie möglich gehalten, um sogar Stöße berücksichtigen zu können. Die Krafterelemente für die normale und tangential Richtung wurden durch die Anwendung mengenwertiger Kraftgesetze modelliert. Deshalb, um die Bewegungsgleichungen zu integrieren, wurde die Time-Stepping Methode verwendet. Um das Stoss-Problem lösen zu können, wurde das Augmented Lagrangian Verfahren angewendet. Das Gesetz der Coulomb-Reibung, welches einen einzigen Reibwert sowohl für Haften als auch für Gleiten vorsieht, darf verwendet werden, weil die Rad-Dynamik als Superposition von Eigenmoden modelliert wird. Darum ist die normale Kontaktkraft nicht konstant, sondern systemzustandabhängig (Gewicht der Eigenmoden) und Selbsterregung ist möglich. Des Weiteren wurde das Gleichgewicht des stationären Gleitzustands untersucht. Dadurch ist es möglich, Konfigurationen bei instabilen Systemen zu bestimmen, ohne die Bewegungsgleichung numerisch integrieren zu müssen, um festzustellen, ob es sich dabei um ein selbsterregtes Phänomen handelt. In dieser Arbeit wurde die Entstehung des Kurvenkreischen auf eine Hopf-Bifurkation des gleitenden Gleichgewichts zurückgeführt. Diese führt zu einem Grenzyklus, der aus einem kurzen Haften und Gleiten zwischen Rad und Schiene besteht. Schließlich wurden die Eigenmoden, die im Kurvenkreischen involviert sind, identifiziert. Diese Arbeit präsentiert eine neue Vorgehensweise für das Verständnis und die Modellierung des Kurvenkreischen-Phänomens. Wichtig ist die Kopplung zwischen Tangential- und Normal-Kraft, die das Entstehen eines selbsterregten Phänomens erlaubt. Ferner sind durch die Stabilitätsanalyse parametrische Untersuchungen möglich, wodurch ermittelt werden kann, welche Konfigurationen des Rad-Schienen-Systems zum Kurvenkreischen führen und welche nicht.