

Verschleiß von Eisenbahnrädern mit Unrundheiten

ABHANDLUNG
zur Erlangung des Titels

DOKTOR DER TECHNISCHEN WISSENSCHAFTEN
der
EIDGENÖSSISCHEN TECHNISCHEN HOCHSCHULE ZÜRICH

vorgelegt von

CHRISTIAN LINDER
Dipl. Ing. - TU Wien
geboren am 16. 1. 1969
aus Kennelbach, Österreich



CatE

Angenommen auf Antrag von:

Prof. Dr. H. Brauchli, Referent
Prof. Dr. O. Krettek, Korreferent

Zürich 1997

Zusammenfassung

Auf den Laufflächen von Eisenbahnradern treten unterschiedliche *Formen des Verschleißes* auf. Dabei entwickeln sich neben den gleichmäßigen Abnützungen über den Radumfang periodische Flachstellen. Dieses Phänomen wird als Polygonbildung bezeichnet und stellt seit mehreren Jahrzehnten speziell Eisenbahnen mit engen Kurvenradien vor große Probleme. Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist die rechnerische Ermittlung dieser Verschleißerscheinung.

Um eine realitätsnahe Beschreibung des Fahrverhaltens von Eisenbahnwagen zu erhalten, bedarf es einer umfassenden Modellierung des *Gesamtsystems* (komplettes Fahrzeug und Gleis). Als Rahmen wird dabei das Mehrkörperdynamikprogramm *Medyna* gewählt. Selbstverständlich liegt das Hauptaugenmerk für die Verschleißberechnung auf den dynamischen Vorgängen zwischen Rad und Schiene, dagegen sind mit einem eingeschränkten Modell nur Einzelaspekte der Polygonbildung erklärbar.

Der Grundstein für die realitätsnahe Verschleißberechnung liegt in der ausgezeichneten Approximation des *nicht elliptischen Kontaktes* zwischen Rad und Schiene. In dieser Arbeit wird eine Näherungsmethode vorgestellt, mit der beliebig geformte Kontaktflächen (einschließlich Mehrpunktkontakt) ohne zusätzliche Iterationen bestimmt werden können. Dies ermöglicht erst den Einsatz in einem Mehrkörperdynamikprogramm, da Zeitschrittintegrationen sehr rechenzeitaufwendig sind.

Das verwendete *Verschleißmodell* setzt den Materialabtrag proportional zur entstehenden Reibarbeit zwischen Rad und Schiene. Daher kommt der Ermittlung der auftretenden Spannungen im Kontaktgebiet große Bedeutung zu. Die Reibarbeit wird dabei nicht als Mittelwert über die gesamte Berührzone berechnet, sondern einzeln in jeden Punkt der Kontaktfläche.

Für dieses Projekt stehen ausgezeichnete *experimentelle Daten* der internationalen Arbeitsgruppe Unrunde Räder (UNRA) zur Verfügung, die im Jahr 1992 den Entstehungsprozeß der Radunrundheiten am Gotthard untersuchte. Eine detaillierte Auswertung dieser Messungen bildet die Basis für die Interpretation der ablaufenden Verschleißvorgänge sowie für den Abgleich von Modellparametern.

Ein Schwerpunkt dieser Arbeit liegt in der Vorausberechnung von *verschlissenen Radprofilformen* auf vorgegebenen Strecken. Dabei wird angenommen, daß der Verschleiß nur in radialer Richtung auftritt und die Räder in Umfangsrichtung ideal rund bleiben. Für zwei völlig unterschiedliche Beispiele (Gotthardstrecke, Streckennetz der Niederlande) werden ausgezeichnete Übereinstimmungen des rechnerisch ermittelten Langzeit-Profilverschleißes mit Meßresultaten erzielt.

Bei den Versuchen am Gotthard traten häufig *einmalige Radiusabweichungen* über den Umfang des Rades auf. Dabei wurden sowohl Radienzunahmen (Buckel) als auch Radienabnahmen (Senken) beobachtet. Diese entwickeln sich infolge von Werkstoffinhomogenitäten (Gefüge, Härte) über den Radumfang. Eine qualitative rechnerische Erfassung wird auf zwei verschiedene Arten realisiert. Auf einen quantitativen Abgleich wird aufgrund der geringen praktischen Bedeutung verzichtet, da ein homogenes Material über dem Radumfang unbedingt gefordert werden muß.

Schließlich gelingt mit der Einbindung von elastischen Radsätzen die rechnerische Simulation der *Polygonbildung*. Dabei kann der Frequenzinhalt des entstehenden Radpolygons mit der *Eigenfrequenz einer dynamischen Eigenform* des Radsatzes verknüpft werden. Im vorgestellten Beispiel führt bereits die erste dominante Eigenform der Radscheibe mit etwa 270 Hz zu einem Polygon mit 35 Ecken. Die Eigenformen der Welle (Torsion und Biegung) sind für die Ausbildung von periodischen Verschleißmustern vernachlässigbar.

Als Folge der sehr hohen Rechenzeiten ist eine kontinuierliche Verschleißsimulation mit elastischen Radsätzen derzeit nicht möglich. Der Prozeß des *Polygonwachstums* kann daher nur anhand von bereits polygonisierten Rädern veranschaulicht werden. Wie bei den experimentellen Beobachtungen verstärken sich auch rechnerisch die Amplituden der auftretenden Unrundheiten.

Abstract

On the treads of railway wheels *different forms of wear* occur. Along with homogeneous abrasion over the circumference of the wheel periodical flattenings develop. This phenomenon is termed polygonisation and has posed severe problems for many decades especially for railways exhibiting curves with a small radius of curvature. The main objective of the present work is the investigation of this wear pattern by computational methods.

For a realistic description of the running behaviour of railway vehicles a sophisticated modelling of the *complete system* (complete vehicle and track) is required. As a basis for the computational model the multibody dynamics package *Medyna* was chosen. Naturally, the main issue for calculating the wear is in modelling the dynamical contact of wheel and rail, with simple models only single aspects of polygonisation can be illustrated.

The basis for a realistic calculation of wear is provided by understanding the *non-elliptic contact* between wheel and rail. In this thesis we present an approximation which allows to calculate contact areas of arbitrary shape (including the simulation for multiple contact points) without iterations. This feature is crucial for an efficient simulation of the dynamics, since the integration of the time evolution of the complete system is very costly.

In the *wear model* a proportionality between wear and frictional work between wheel and rail is assumed. Accordingly, the determination of the stresses in the contact region is of major importance. The frictional work is then computed pointwise and integrated over the area of contact.

For this project an excellent set of *measuring data* were made available by an international group "Unrunde Räder" (UNRA). In 1992 experiments were carried out on the Gotthard line investigating the process of polygon formation on railway wheels. A detailed evaluation of these experiments leads to further interpretations of the wear process and allows for adapting some of the model parameters.

Special emphasis of this work is put on the prediction of *worn wheel profiles* on given tracks. Thus the wheels are assumed to wear out just in radial direction and to remain ideally circular. The long-term profile wear is calculated for two very different examples (Gotthard line, Dutch track network). Both results are in good agreement with the field measurements.

In the experiments on Gotthard line mainly *single deviations of the radius* emerge on a sector of the wheel. Both increases and decreases of the radius are noticed. They arise from material inhomogeneities (structure, hardness) on the tread. A qualitative computation is realised with two different methods. Due to the minor practical importance a quantitative adjustment is not pursued. Homogeneous material over the circumference of the wheel is considered to be a basic requirement.

Finally, the formation of *polygonised wheels* is obtained by simulations with elastic wheelsets. Thereby the frequency of the occurring polygon is connected with the resonance frequency of a the wheelset. An example of a polygon with 35 edges produced by a mode of the wheel with 270 Hz is presented. The modes of the axle (torsion, bending) are negligible for the formation of periodical wear patterns.

Due to the very time consuming calculations by using elastic wheelsets a continuous wear simulation is not feasible at the time being. Hence the *process of growth of edges* can only be illustrated with already polygonised wheels. A reasonable agreement of experimental results and computation is found.