

# Hochdetaillierte Modellierung der Fahrzeug-Fahrweg-Wechselwirkung

*Dipl.-Ing. Ingo Kaiser, Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR), Institut für Robotik und Mechatronik, Weßling-Oberpfaffenhofen*

## 1. Einführung und Motivation

Die computergestützte Simulation ermöglicht eine effiziente und kostengünstige Entwicklung von Schienenfahrzeugen: So lassen sich beispielsweise Risiken noch vor dem eigentlichen Bau des Fahrzeugs erkennen. Ebenfalls können unterschiedliche Konstruktions- und Auslegungsvarianten systematisch untersucht und bewertet werden, um die günstigste Variante zu finden. Dies erspart teure nachträgliche Änderungen bereits ausgeführter Konstruktionen und vermindert das Produktrisiko.

Insbesondere die Mehrkörpersimulation hat sich zu einem Standardwerkzeug der Auslegung von Schienenfahrzeugen entwickelt, und die heute verfügbaren kommerziellen Simulationsprogramme decken eine große Bandbreite an Problemstellungen ab. Gleichwohl gibt es immer noch einige Phänomene, in denen eine detailliertere Modellierung des Fahrzeugs wünschenswert erscheint. Hierzu zählt insbesondere der Verschleiß, dessen genauere Untersuchung insofern wünschenswert ist, als dieses Phänomen einen starken Einfluss auf den Unterhaltungsaufwand und damit auf die Wirtschaftlichkeit des Fahrzeugs und des gesamten Fahrzeug-Fahrweg-Systems hat.

Grundsätzlich kann Materialabtrag nur dort auftreten, wo die Oberflächen von Rad und Schiene sich tatsächlich berühren. Eine brauchbare Modellierung des Verschleißes erfordert daher relativ genaue Kenntnis des tatsächlichen Kontaktgebiets und der dort vorliegenden Spannungsverteilung.

Die Modelle für den Rad-Schiene-Kontakt bewegen sich zwischen zwei Polen, der Genauigkeit einerseits und der Recheneffizienz andererseits. Einfache, aber dafür sehr rechenzeiteffiziente Modelle werden insbesondere bei der Dynamiksimulation eingesetzt: Zum einen wird hierbei die Berechnungsprozedur sehr häufig ausgeführt, zum anderen ist nur die resultierende Kraft im Kontakt notwendig, also die Summe der Spannungen, so dass die Genauigkeitsanforderungen an die Verteilung der Spannungen geringer sind. Hierzu zählen insbesondere die Beschreibung des Kontakts mittels der Hertz'schen Theorie, wobei die Kontaktfläche als Ellipse aufgefasst wird, und die Bestimmung der Tangentialkräfte mittels der vereinfachten Theorie von Kalker. Am anderen Ende der Skala finden sich sehr detaillierte Modelle wie etwa das Programm CONTACT von Kalker oder Finite-Elemente-Modellierungen des Rad-Schiene-Kontakts. Diese Verfahren können nahezu beliebige Kontaktflächen behandeln, allerdings ist der Rechenaufwand sehr groß, so dass eine Integration in eine Dynamiksimulation schwierig ist.

Für eine brauchbare Modellierung des Verschleißes ist eine Kontaktmodellierung, die zumindest nicht-elliptische Kontaktflächen beschreiben kann, notwendig. Eine Verfeinerung der Kontaktmodellierung ist jedoch ohne entsprechende Verfeinerungen der Modelle für Fahrzeug und Fahrweg wenig sinnvoll: Das Kontaktgeschehen wird von den Relativbewegungen von Radkranz und Schienenkopf bestimmt. Neben den Starrkörperbewegungen des Radsatzes, insbesondere der Querverschiebung und der Gierbewegung, wirken sich auch Deformationen von Radsatz und Schiene auf die Relativkinematik von Radkranz und Schienenkopf aus. Einerseits sind diese Deformationsbewegungen deutlich kleiner als die Starrkörperbewegungen, andererseits kann der Rad-Schiene-Kontakt gegenüber kleinen Änderungen der Relativlage sehr sensitiv sein, d.h. schon kleine Änderungen der Relativlage können zu einem deutlich veränderten Kontaktbild führen.

Aus diesen Gründen wurde ein sehr detailliertes Modell für das Fahrzeug-Fahrweg-System entwickelt, welches neben einer detaillierten Kontaktbeschreibung auch die Deformationen und die Struktur-dynamik von Radsätzen und Schienen berücksichtigt.

## 2. Modell

Das Simulationsmodell beschreibt einen Reisezugwagen mit zwei zweiachsigen Drehgestellen, der auf einem geraden Gleis läuft. Das Modell ist im Bild 1 dargestellt, wobei Modifikationen gegenüber der „Standardmodellierung“ als starres Mehrkörpersystem hervorgehoben sind. Die Radsätze und die Schienen werden als flexible Körper modelliert. Oberhalb der Primärfederung werden die Fahrzeugstrukturen als starre Körper beschrieben, da sie durch die Primärfederung ausreichend entkoppelt sind, so dass die Struktur-dynamik von Drehgestellrahmen und Wagenkasten praktisch keinen Einfluss auf die hochfrequenten Vorgänge zwischen Radsatz und Gleis haben. Die aus der Abrollbewegung

der Radsätze resultierenden Kreiseffekte werden ohne Genauigkeitsverlust berücksichtigt. Die Schienen werden nicht als Balken, sondern als dreidimensionales Kontinuum modelliert, um auch Verformungen des Querschnitts, die sich auf die Bewegungen des Schienenkopfs auswirken können, zu erfassen. Die vier Radsätze und zwei Schienen werden durch insgesamt acht Rad-Schiene-Kontaktelemente verbunden. Innerhalb jedes Kontaktelements werden im Rad-Schiene-Kontakt auftretenden Normal- und Tangentialspannungen ausgehend von der Profilgeometrie und den Relativbewegungen mittels der Halbraumgleichungen von Boussinesq und Cerrutti bestimmt. Die Spannungsverteilung wird also numerisch berechnet und nicht nur abgeschätzt, was zur Genauigkeit und Verlässlichkeit des Modells beiträgt.

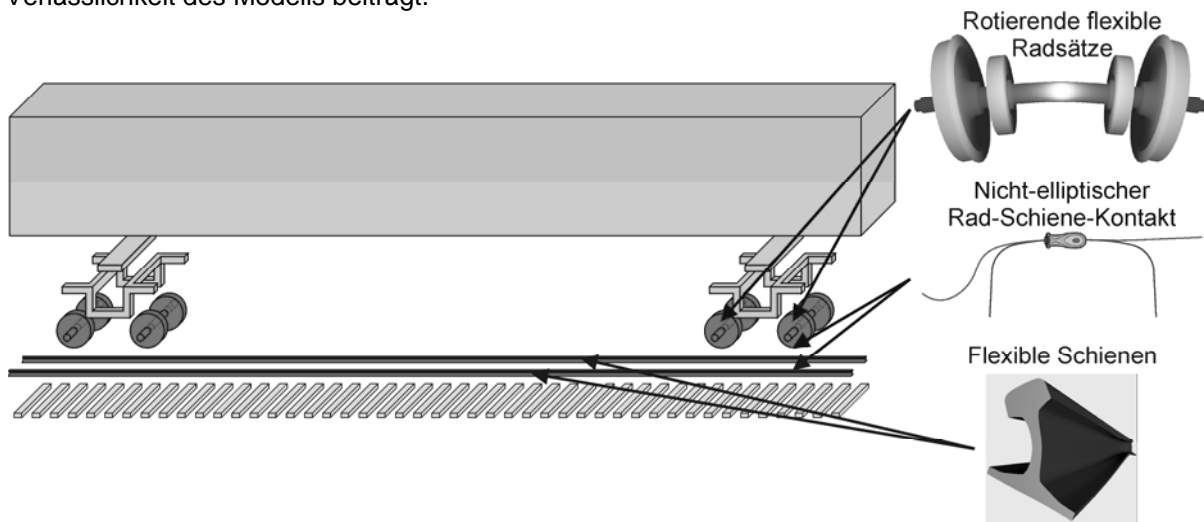


Bild 1: Fahrzeug-Fahrgeweg-Modell

### 3. Ergebnisse

Exemplarisch soll der Fall des zentrischen Laufs in der Geraden betrachtet werden. Hierbei wurde die Spannungsverteilung im Kontakt des rechten vordersten Rades für zwei Modellvarianten bestimmt, nämlich für die „Standardmodellierung“, bei der Radsätze und Schienen als starre Körper aufgefasst werden, und für die detaillierte Modellierung, bei der die Strukturmechanik von Radsätzen und Schienen berücksichtigt wird. Die Ergebnisse sind im Bild 2 dargestellt, nämlich die Geometrie der Profile von Rad und Schiene sowie das Profil der Normalspannungsverteilung, die Verteilung der Normal- und Tangentialspannungen im Kontakt sowie die Verteilung der Reibleistungsdichte, die für den Materialabtrag relevant ist. Infolge der geneigten Lauffläche tritt im Kontakt Bohrschlupf auf.

Das auf dem Radsatz lastende Gewicht des Wagenkastens und des Drehgestellrahmens bewirkt eine Durchbiegung der Radsatzwelle, die qualitativ der in Bild 1 dargestellten Deformation ähnelt. Diese Durchbiegung führt wiederum zu einer Neigung des Laufkranzes des Rades. Die daraus resultierende Änderung der Relativlage von Radkranz und Schienenkopf ist zwar sehr klein und bei der Betrachtung der Profilgeometrie ist praktisch nicht zu erkennen. Dennoch bewirkt diese Veränderung eine deutliche Veränderung des Kontaktgebiets: Während bei der Modellvariante „starrer Radsatz/ starre Schiene“ zwei Maxima der Normalspannung zu erkennen sind, verschwindet das linke Maximum für die Modellvariante „flexibler Radsatz/flexible Schiene“ fast völlig, während das rechte Maximum stark anwächst. Ebenso verändert sich die Verteilung der Tangentialspannungen, was letztlich auch zu einer deutlichen Veränderung der Reibleistungsdichte führt: Das ausgeprägte Maximum, das im linken Bereich des Kontakts für die Modellvariante „starre Radsätze/ starre Schienen“ auftritt, verschwindet für die Variante „flexible Radsätze/flexible Schienen“ fast völlig.

Auch wenn in diesem Fall die statische Durchbiegung des Radsatzes dominiert, so kann das Modell auch dynamische Effekte beschreiben wie beispielsweise Strukturschwingungen von Radsatzwelle, Radscheibe und Schienen, die durch Gleislagefehler oder Laufflächenirregularitäten angeregt werden können. Auch die Anregung infolge der diskreten Schienenlagerung durch die einzelnen Schwellen wird durch das Modell voll wiedergegeben.

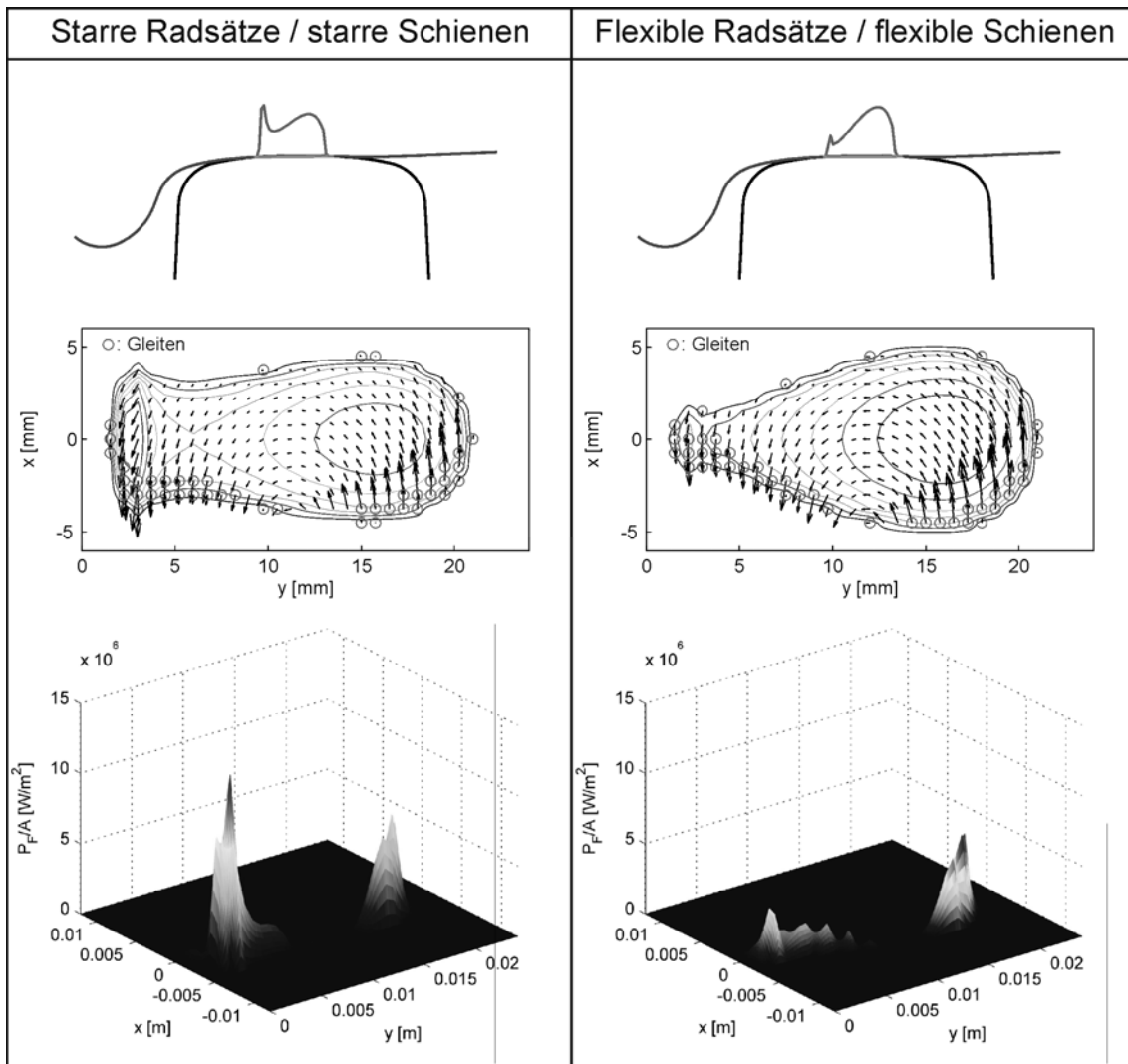


Bild 2: Profilgeometrie und Normalspannungsverteilung (oben), Verteilung von Normal- und Tangentialspannungen (Mitte) und Verteilung der Reibleistungsdichte (unten) für Modellierung von Radsätzen und Schienen als starre und flexible Körper

#### 4. Zusammenfassung und Ausblick

Bereits in dem vergleichsweise „unspektakulären“ Fall des zentrischen Laufs zeigt sich, dass die Verformungen von Radsatz und Schiene infolge ihrer Strukturelastizität einen deutlichen Einfluss auf die Verteilungen der Spannungen und der Reibleistungsdichte haben. Weitere Berechnungen zeigen auch für Querbewegungen des Radsatzes im Spurkanal deutliche Einflüsse der Deformationen von Radsätzen und Schienen. Aus diesem Grund sollte ein Modell, das den Verschleiß zuverlässig bestimmen soll, neben einer detaillierten Kontaktmodellierung auch die Strukturmechanik von Radsätzen und Schienen berücksichtigen.

Die hier vorgestellten Methoden und Modelle wurden im Rahmen des DLR-internen Projekts „Next Generation Train“ entwickelt und sollen zur Simulation der dort entwickelten Fahrzeugkonzepte eingesetzt werden. Da der Verschleiß einen wesentlichen Einfluss auf die Life Cycle Costs (LCC) des Fahrzeugs hat, lassen sich mit dieser Modellierung Maßnahmen zur Verschleißreduktion und damit zur Optimierung der Wirtschaftlichkeit des Fahrzeugkonzepts nachweisen. Darüber hinaus ermöglicht die vorgestellte Modellierung von Radsätzen und Schienen als flexible Körper auch die Untersuchung höherfrequenter Phänomene bis hin zur Akustik. Zum einen entsteht Lärm in vielen Fällen durch Strukturschwingungen, zum anderen werden Strukturschwingungen von Radsätzen und Schienen durch Oberflächenirregularitäten wie Radpolygone oder Schienenriffel angeregt. Derartige ungleichmäßige Verschleißformen können mit dem vorgestellten Modell ebenfalls untersucht werden.