

Der nächste Schritt: Fatigue

FE-Spannungsanalysen eines Modells der Größenordnung des abgebildeten Drehgestellrahmens (ca. 100 000 Freiheitsgrade) für eine Vielzahl von Lastzuständen scheitern an der benötigten Rechenleistung. Die Entwicklung einer im Frühjahr 1998 erhältlichen SIMPACK-FEM-Schnittstelle zur breit angelegten Be-

rechnung von Bauteilspannungen als Ergebnis der Mehrkörpersimulation nähert sich dem Problem daher aus einer anderen Richtung. Basierend auf den Ergebnissen verschiedener Spannungsanalysen mit SIMPACK, FEMBS¹ und einem FEM-Programm wird für die kritischen Stellen eine Last-Spannungsmatrix aufgestellt mit vorab be-

rechneten Einheitslasten, Einheitsbeschleunigungen und Eigenmodes. Die Ergebnisse der SIMPACK-Simulation wirken als zeitabhängige Faktoren für die Einheitslasten, so daß Spannungs-Zeit-Verläufe als Ausgangspunkt für die Betriebsfestigkeitsanalyse ermittelt werden können [1].

[1] Dietz, Netter, Sachau: Fatigue Life Predictions by Coupling Finite Element and Multibody Systems Calculations, 1997 ASME Design Engineering Technical Conferences September 14-17, Sacramento, California

Rad und Schiene

Bei den spurgeführten Verkehrssystemen konnte die Rad-Schiene Technik trotz milliardenschwerer Forschungsförderung der Magnetschwebetechnik hinsichtlich realisierbarer Fahrgeschwindigkeiten und Fahrkomfort noch immer die Nase vorne halten.

Warum?

Wie packt SIMPACK die Problematik an?

Ein Essay von Dr. Lutz Mauer, INTEC GmbH

Der Radsatz ist das charakteristische Konstruktionsmerkmal der Schienenfahrzeuge. Er vereint in seiner klassischen Ausführung alle benötigten Funktionen in nur einem Element:

- Tragen
- Führen
- Antreiben und Bremsen

Schauen wir uns daher die etwa pfenniggroße Kontaktfläche von Rad und Schiene näher an. Getreu dem Prinzip der „Eisenbahn“ ist hier Stahl auf Stahl im direkten Kontakt. Bei etwa 20 Tonnen Achslast (Lokomotiven und beladene Güterwagen) liegen die Druckspannungen im Rad/Schiene-Kontakt nahe der Fließgrenze. Schon aus der Anfangszeit der Pferdebahnen war bekannt, daß die Wagen besser laufen, wenn

- a) die Räder über die Achswelle starr miteinander verbunden sind
- b) die Radlauflächen nicht zylindrisch, sondern konisch ausgeführt sind.

CARTER beobachtete 1874 bei Lokomotiven mit konischen Lauflächenprofilen eine Wellenbewegung. KLINGEL veröffentlichte 1883 den kinematischen Zusammenhang zwischen den geometrischen Parametern des Radsatzes und der Wellenlänge des sogenannten „Sinuslaufs“, welcher den Selbstzentrierungseffekt bewirkt. Diese Gesetzmäßigkeit diente fast ein ganzes Jahrhundert zur Beschreibung der Schwingungsdynamik von Schienenfahrzeugen.

Die Tragfunktion wird hauptsächlich durch den Formschluß der Lauflächenprofile von Rad und Schiene übernommen.

Die Führungsfunktion geschieht im wesentlichen durch den Kraftschluß. Der aus der Gravitationsrückstellung gewinnbare Führungseffekt ist verhältnismäßig klein, wie es sich bei nichtgesteuerten Losradkonzepten immer wieder zeigt.

Mit Ausnahme der Zahnradbahnen geschieht das Antreiben und Bremsen komplett über den

Kraftschluß. Auch im Zeitalter der Magnetschienen- oder Wirbelstrombremse sowie elektrogeneratorischer Bremse wird auf die mechanische Scheibenbremse in der Regel nicht verzichtet. Von besonderem Interesse beim rollenden Kontakt ist der Kraftschluß in einem schmalen Übergangsbereich zwischen dem durch KLINGEL beschriebenen kinematischen Rollen und dem Gleiten im COULOMB'schen Sinne. Folglich teilt sich das Kontaktgebiet zwischen Rad und Schiene in eine Haft- und in eine Gleitzone auf. In der Haftzone sind die Tangentialspannungen τ kleiner als das Produkt aus Normalspannung σ und Reibbeiwert μ .

$$\tau_H < \mu\sigma$$

In der Gleitzone muß die Tangentialspannung mit der Reibbeiwert-gewichteten Normalspannung im Gleichgewicht stehen:

$$\tau_G = \mu\sigma$$

Die beschreibende Größe in diesem Übergangsbereich ist der Schlupf, welcher für die fahrgeschwindigkeitsbezogenen Relativgeschwindigkeiten im Radaufstandspunkt steht. Für reinen Längsschlupf wurden die theoretischen Verhältnisse 1926 unabhängig voneinander von CARTER und FROMM theoretisch beschrieben. Die vollständige dreidimensionale Lösung des Kraftschlußproblems für HERTZ'sche Kontaktflächen erarbeitete KALKER im Jahr 1967. Man beachte, daß diese „klassische“ Theorie überhaupt keine Aussage zum Reibbeiwert selbst macht. Der Reibbeiwert wird ebenso wie der Elastizitätsmodul als Normierungsgröße verwendet, so daß die Theorie nicht mit der Problematik der Bestimmung von Reibbeiwerten belastet ist.

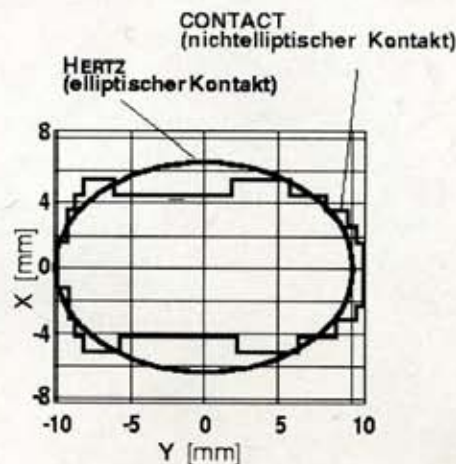
Können die Oberflächen der sich berührenden Körper als Flächen zweiter Ordnung beschrieben werden, so liegt eine sog. HERTZ'sche Berührung vor, welche im dreidimensionalen Fall auf elliptische Kontaktflächen führt. Für die Hertz'sche Berührung ist beim rollenden Kontakt, wie Kalker gezeigt hat, die Berechnung der Tangentialspannungsverteilung unabhängig von der Berechnung der Normalspannungsverteilung. Auf Grund dieser Tatsache ist der Kraftschluß im Rahmen einer Simulation überhaupt berechenbar.

Trotzdem nahm es KALKER auf sich, eine sogenannte „vereinfachte nichtlineare Theorie“ zu erstellen (Rechenprogramm FASTSIM), die deutlich kürzere Rechenzeiten zeigt.

Leider zeigen die realen Kontaktflächen von Rad und Schiene nur in den wenigsten Fällen eine elliptische Umrandung. KALKERS Rechenprogramm CONTACT zur Kraftschlußberechnung

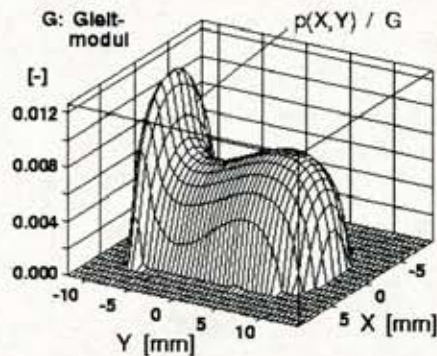
nichtelliptischer Kontaktflächen kann aber aufgrund der hohen Rechenzeiten mit den uns heute zur Verfügung stehenden Rechnern nicht in der Dynamiksimulation von vierachsigen Fahrzeugen eingesetzt werden. Zur Lösung dieses Problems werden derzeit folgende Umschreibungen angewandt:

- a) Bestimmung einer äquivalenten elliptischen Kon-



taktfläche, die bezüglich des Kraftschlusses an charakteristischen Betriebspunkten die gleichen Schlupfkkräfte erbringt wie die nichtelliptische Kontaktfläche.

- b) Zerlegung der nichtelliptischen Kontaktfläche in Längsstreifen, für die jeweils angenommen wird,



daß die Hertz'sche Kontaktbedingung eingehalten ist.

Beide Verfahren müssen vor ihrem Einsatz in der Mehrkörper-

simulation durch Vergleichsrechnungen mit dem Programm CONTACT hinsichtlich einer möglichst guten Übereinstimmung angepaßt und optimiert werden.

Ein reales Schienenfahrzeug befährt nicht nur eine 500 m lange Referenzstrecke mit genau bekannten Daten zur Verifikation von Simulationssoftware, sondern ein Streckennetz mit weit streuenden Konstruktionsparametern und stark veränderlichen Witterungsbedingungen. Auslegungsrechnungen von Schienenfahrzeugen können daher durchaus mit empirischen Kraftschlußfunktionen durchgeführt werden, die mittlere Verhältnisse abbilden. Die in der Literatur zu findenden empirischen Funktionen unterscheiden sich hauptsächlich in der Genauigkeit der Berücksichtigung des Einflusses des Bohrschlupfs.

SIMPACK WHEEL/RAIL

Sofern der Benutzer keine empirischen Kraftschlußfunktionen oder seine eigenen User-Routinen anwählt, arbeitet SIMPACK mit der Methode a). Das

Geheimnis ihrer hohen Genauigkeit liegt in der Art der Berechnung der äquivalenten Kontaktellipse. Die bestimmenden Größen werden anhand des sog. quasielastischen Kontaktmodells bestimmt. Zur Berechnung des Kontaktes von Rad und Schiene hinsichtlich Kraft- und Formschluß stehen in SIMPACK drei unterschiedliche Vorgehensweisen zur Verfügung:

- a) Starres Kontaktmodell. Die Lage des Berührungspunktes von Rad und Schiene wird anhand der Betrachtung der theoretischen Laufflächenprofile gefunden. Diese Vorgehensweise führt bei realen Laufflächenprofilen auf Unstetigkeitsstellen in Form sog. Berührungspunktsprünge. Diese Unstetigkeiten erscheinen auch in der zu formulierenden Zwangsbedingung zwischen Rad und Schiene. Sie schaffen ernsthafte Probleme bei der numerischen Lösung der Bewegungsgleichungen.
- b) Quasi elastisches Kontaktmodell. Die Lage des Berührungspunktes und die Form der äquivalenten Kontaktellipse wird mittels spezieller Regularisierungsfunktionen anhand der Durchdringungsfunktion der sich überdeckenden Profilfunktionen berechnet. Das Verfahren vermeidet die bei a) auftretenden Unstetigkeiten.
- c) Elastisches Kontaktmodell. Berührungspunktslage und äquivalente Kontaktellipse wird wie in b) berechnet. Jedoch wird eine einseitig Kontaktfeder eingeführt, die in Relation zu dem Normalspannungssystem steht.

Typisch für den Kontakt von Rad und Schiene ist der sog. Mehrpunktkontakt. Eine wesentliche Ausprägung tritt bei Bogenfahrt am anlaufenden Rad auf. Bekannt aus der Weichenfahrt ist noch der sog. Spurkranzrückkontakt bei Radlenkern. Zur Erfassung von Mehrpunktkontakt

wurde für SIMPACK ein spezielles Verfahren entwickelt, das auf der Basis des quasielastischen Kontaktmodells arbeitet. Es wird dabei von einer Stetigkeit der Verteilung der Zwangskraft bezüglich der Relativkinematik ausgegangen.

Ortsveränderliche Laufflächenprofile der Schienen spielen insbesondere bei der Weichenüberfahrt eine große Rolle. Im Straßenbahngleis finden sich zum einen verschiedene Typen von Schienen mit unterschiedlichen Kopfprofilen. Zum anderen sind häufig periodisch ausgefahrene Schienen anzutreffen, wobei sich sofort die Frage stellt, wie die neuen Niederflurbahnen damit zu Rande kommen.

Unterschiedliche Reibbeiwerte können für folgende Situationen vorgegeben werden:

- Spurkranzschmierung: der Reibbeiwert wird als Funktion der Querkoordinate der Schiene vorgegeben
- Unterschiedliche Umgebungsbedingungen: der Reibbeiwert wird als Funktion der Wegkoordinate des Gleises vorgegeben.

Die mittels des Preprozessors erstellten Kontakttabellen sind in Relativkoordinaten angelegt, so daß biegeelastische Radsätze ebenso wie Losradsätze und elastisch gebettete Schienen gerechnet werden können. Der Laufdynamikingenieur ist somit in der Lage, alle klassischen und alle innovativen Varianten der Kontaktmechanik und der Rad-

führung zu modellieren und effektiv zu berechnen.

Validierung und Verifizierung:

Mit den in SIMPACK bereitgestellten Kontaktmodellen wurden umfangreiche vergleichende Gegenrechnungen zur Validierung vorgenommen: Die bekannten Rad/Schiene-Benchmarktests, Modelle von Schienenfahrzeugherstellern, sowie Plausibilitätskontrollen zur Untersuchung des Einflusses der Schwingungsanregung aus den Führ- und Störgrößen der Gleistrassierung. In Zusammenarbeit mit der ERRI wurde in dem Projekt *Entgleisung von Güterwagen* die von der DB AG durchgeführten experimentellen Entgleisungsversuche mit entsprechenden Simulationsrechnungen gegenübergestellt und verglichen. Es zeigte sich, daß die Rechnungen alle im Versuch aufgetretenen Effekte wiedergeben. Darüber hinaus ist die Übereinstimmung der Zeitsignale aus Rechnung und Versuch derart gut, daß bei zukünftig zu führenden Nachweisen der Entgleisungssicherheit die Zahl der notwendigen Fahrversuche deutlich reduziert werden kann, wenn begleitende SIMPACK-Rechnungen durchgeführt werden.

Die vielfältigen und ausgereiften Funktionalitäten machen SIMPACK zu einem mächtigen Werkzeug, das dem Anwender die Möglichkeit eröffnet, Entwicklungszeiträume und das Entwicklungsrisiko deutlich zu reduzieren.