

Reifensimulation mit *FTire*: Stand und Ausblick

Tire Simulation with FTire: Status and Developments

Prof. Dr. rer. nat. **Michael Gipser**
Hochschule Esslingen

Zusammenfassung

Der Beitrag erläutert exemplarisch, anhand einiger kürzlich implementierter Erweiterungen, den momentan erreichten Stand von *FTire*. Im Einzelnen handelt es sich um die Simulation von Motorradreifen auch bei extremen Sturzwinkeln, um eine Modellverfeinerung für die lokale Gürteldeformation, um die detaillierte Darstellung verteilter Ungleichförmigkeiten, um neue, hoch aufgelöste und effiziente Straßenmodelle, und um verfeinerte Werkzeuge für Parametrierung und Validierung.

Summary

The contribution addresses some aspects of the actual status of *FTire*. This discussion comprises recent enhancements in the model, like motorcycle tire simulation with very large camber angles, a detailed local belt distortion approach, distributed tire imperfections, new detailed and efficient road models, as well as improved tools for parameterization and validation.

1 Einführung

Seit nunmehr sieben Jahren wird die Reifensimulations-Software *FTire* entwickelt und kontinuierlich verbessert. Mittlerweile gehört *FTire* zu den häufig genutzten und allgemein akzeptierten Reifenmodellen für Schwingungskomfort, Fahrverhalten und Lastkollektiv-Berechnungen im Rahmen von Lebensdauer-Simulationen ([1], [2], [5], [8]). Die Stärke von *FTire* ist seine streng physikalisch basierte Modellierung. Dabei werden alle relevanten Anregungsquellen und nichtlinearen Übertragungsmechanismen, bis hin zu hohen Frequenzen und kurzen Anregungswellenlängen, berücksichtigt – zwar oft vereinfacht, aber immer physikalisch konsistent. Diese Art der Modellierung wird ergänzt durch ein angepasstes, numerisch robustes und schnelles Integrationsverfahren, sowie durch eine komfortable Programmschnittstelle. *FTire* ermöglicht so die Simulation auch extremer Manöver und Betriebsbedingungen in akzeptabler Rechenzeit. Schnittstellen für die meisten wichtigen MKS-Programme sind verfügbar.

In den folgenden Abschnitten wird der Stand von *FTire* anhand einiger wichtiger, kürzlich fertig gestellter Erweiterungen von Modell, Software und zugehörigen Werkzeugen aufgezeigt. Für eine umfassende Beschreibung der Modellbildung in *FTire* wird auf die Dokumentation in [4] verwiesen.

2 FTire als Motorradreifen-Modell

Eine wichtige Erweiterung in *FTire* ist die Möglichkeit, Motorradreifen auch bei extremen Sturzwinkeln zu simulieren. Diese Erweiterung machte Verbesserungen in der Geometriebeschreibung von Gürtel und Laufstreifen, im Teilmodell der elastischen Gürteldeformation, wie auch im Kontaktprozessor erforderlich.

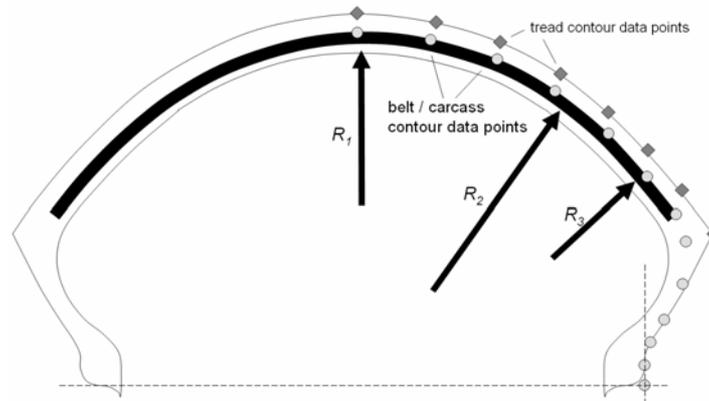


Abb. 1: Motorradreifen-Querschnitt mit beschreibenden Spline-Daten
Motorcycle tire cross-section, with describing data points

Der Reifenquerschnitt eines Motorradreifens, wie natürlich auch der jedes anderen Reifens, kann in *FTire* auf zwei Arten beschrieben werden (vgl. Abb. 1). Entweder wird vereinfacht ein konstanter Quer-Krümmungsradius der äußersten Karkasse- bzw. Gürtellage angenommen, oder die Geometrie von Karkasse und Laufstreifenoberfläche wird detailliert durch je eine beliebige Anzahl von x/y -Werten angegeben. Der zweite, neue Ansatz wird im Abschnitt 4 diskutiert.

Es ist bekannt, dass die Querschnitt-Geometrie des Reifens großen Einfluss auf Größe und Form der Aufstandsfläche und auf die Bodendruckverteilung hat. Damit beeinflusst sie wichtige Reifeneigenschaften, wie zum Beispiel die Handling-Charakteristik. Konsequenterweise wird die Querschnitt-Geometrie auch in *FTire* so genau wie möglich abgebildet.

Die zweite, für Motorradreifen notwendige Verbesserung war eine genauere Ausrichtung der Kontaktelemente. Wegen der möglichen extremen Sturzwinkel und der fast torusförmigen Reifenoberfläche musste die Richtung der Kontaktelemente normal zur Oberfläche des Laufstreifens gewählt werden. Bisher wurden sie vereinfachend im undeformierten Zustand radial angeordnet, ihre Richtung war also senkrecht zur Raddrehachse.

Der Unterschied zwischen diesen beiden Ausrichtungen ist in seiner Auswirkung auf die Reifeneigenschaften vernachlässigbar, solange die Krümmung des Gürtels in Querrichtung klein ist. Dies ist aber bei Motorradreifen nicht der Fall.

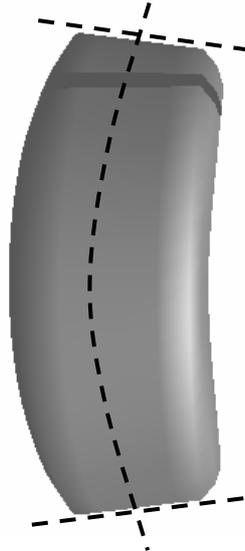


Abb. 2: Kinematische Kopplung von radialer Gürtelbiegung und Gürteltorsion um Umfangsrichtung

Kinematic coupling of out-of-plane bending and circumferential torsion

Als dritte Maßnahme wurde eine genauere 'kinematische Kopplung' zwischen der Gürtelbiegung um die radiale Achse und der Gürteltorsion um die Umfangsrichtung eingeführt, vgl. Abb. 2. Bei großen Sturzwinkeln ruft nicht nur die Seitenkraft, sondern auch die vertikale Radlast ein entsprechendes Biegemoment hervor. Deswegen beeinflusst die angesprochene, nicht vernachlässigbare Kopplung die genaue Position und die Form der Aufstandsfläche, mit allen Konsequenzen auf die globalen Reifeneigenschaften.

Die Berücksichtigung dieser Kopplung ist relativ einfach. Das lokale Koordinatensystem eines Gürtelsegmentes (bzw. eines Karkasselementes bei Radialreifen), in dem die Biegungen und die resultierenden Biegemomente berechnet werden, wird um einen konstanten Bruchteil der Gürteltorsion mitgedreht. Dieser Bruchteil ist 1 bei vollständiger Kopplung und 0, falls die Kopplung überhaupt nicht berücksichtigt wird. Der entsprechende neue Parameter im Datenfile (`belt_torsion_oop_bend_coup1`) ist optional. Selbstverständlich ist auch eine nur partielle Kopplung, beschrieben durch Werte zwischen 0 und 1, möglich.

Schließlich stellte sich heraus, dass für Motorradreifen eine genauere Beschreibung der Gürtel- bzw. Karkassbiegung in Querrichtung unverzichtbar ist. Der hierbei verwendete neue numerische Ansatz wird in Abschnitt 3 näher erläutert. Ursprünglich wurde die Biegung durch eine einzelne quadratische Funktion approximiert. In der Nähe der Laufstreifenränder kann dies lokal zu einem relativ großen numerischen Fehler führen. Dieser Fehler wirkt sich besonders bei Motorradreifen unter großem Sturzwinkel stark aus, da dann die gesamte Aufstandsfläche in der Nähe des Laufstreifenrandes liegt.

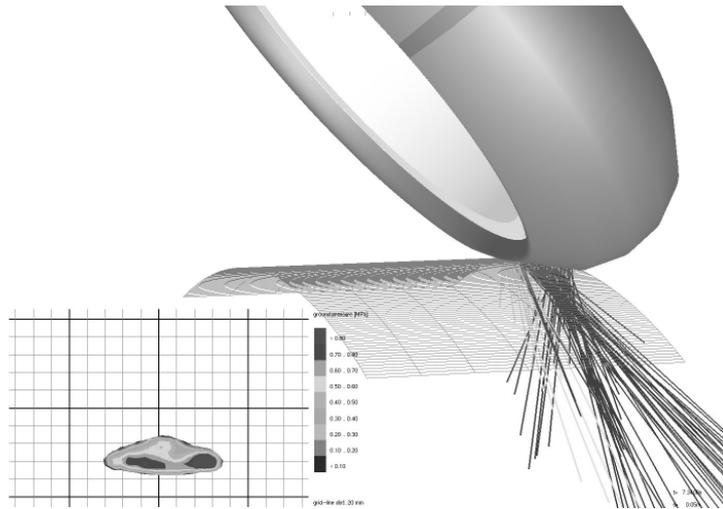


Abb. 3: *FTire* Motorradreifen-Modell auf Trommelprüfstand, bei 35 Grad Sturzwinkel

FTire motorcycle model on drum, at 35 deg camber angle

Die Abbildungen 3 bis 5 zeigen einige Ergebnisse vom Motorradreifen-Simulationen. Das erste Bild (Abb. 3) ist ein Schnappschuss während einer Sturzseitenkraft-Simulation auf einem Außentrommelprüfstand, bei ca. 35 Grad Sturzwinkel. Die Form der resultierenden Aufstandsfläche und die Bodendruckverteilung werden in einem kleinen Konturplot dargestellt. Dieser Konturplot wird während einer Simulation im Animationsfenster dynamisch berechnet und angezeigt.

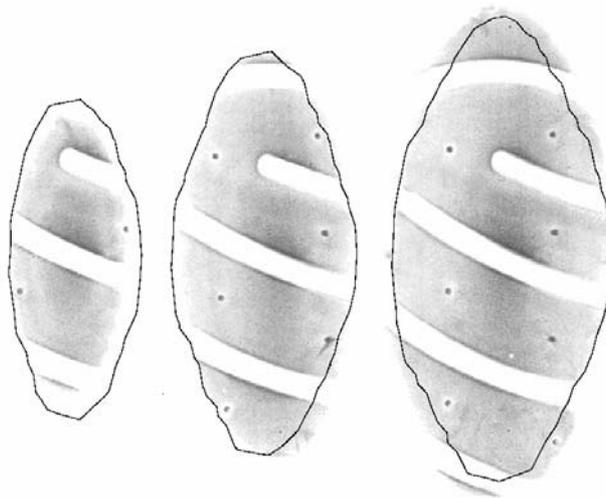


Abb. 4: Vergleich zwischen gemessenen (Bitmap) und simulierten (Linie) Aufstandsflächen eines Motorrad-Hinterreifens bei 1000/2000/3000 N Radlast und 20 Grad Sturzwinkel

Comparison between measured (bitmap) and simulated (line) foot print shapes of a rear motorcycle tire at 1000/2000/3000 N and 20 deg camber angle

Die genaue Form der Aufstandsfläche ist jedoch besser in Abb. 4 erkennbar. Hier sind gemessene und simulierte Aufstandsflächen bei drei verschiedenen Radlasten für einen Hinterreifen bei 20 Grad Sturzwinkel vergleichend dargestellt. Die Simulationsergebnisse sind offensichtlich in sehr guter Übereinstimmung mit den Messungen.

Abb. 5 schließlich zeigt simulierte Sturzseitenkraft-Diagramme für je einen Vorder- und einen Hinterreifen. Beide Simulationen wurden quasistationär bis zu dem extremen Sturzwinkelwert 60 Grad durchgeführt. Auch hier war die Übereinstimmung mit entsprechenden Messungen, die allerdings nur bis etwa 40 Grad vorlagen, sehr gut.

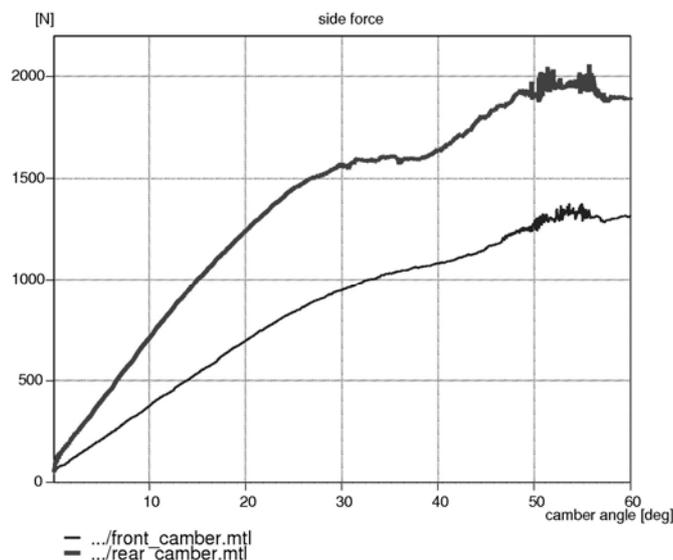


Abb. 5: Simulierte Sturz-Seitenkraft (stationäre Seitenkraft als Funktion des Sturzwinkels bei 0 Grad Schräglaufwinkel) eines Motorrad-Vorderreifens bei 1500 N Radlast (untere Kurve) und eines Hinterreifens bei 2000 N Radlast (obere Kurve)

Simulated camber thrust (steady-state side force vs. camber angle at zero side-slip angle) of a motorcycle front tire at 1500 N (lower curve), and a rear tire at 2000 N (upper curve)

3 Verfeinertes Modell der Gürtelbiegung

Die aktuelle *FTire*-Version verfügt über ein genaueres Gürtel deformations-Modell. Wie in Abschnitt 2 schon angedeutet, berücksichtigt dieser Ansatz sehr viel detaillierter die Form der Gürtelbiegung in Querrichtung. Dazu wurden jedem Gürtelsegment weitere verallgemeinerte kinematische Freiheitsgrade zugeordnet. Bei diesen Freiheitsgraden handelt es sich um die Koeffizienten bestimmter Ansatzfunktionen, die ihrerseits Eigenlösungen des elastisch gelagerten Biegebalkens darstellen.

Natürlich stellt auch dieser Ansatz, der im Folgenden genauer beschrieben wird, nur eine grobe Näherung der tatsächlichen Flexibilität dar und kann keinesfalls mit einem genauen FE-Modell konkurrieren. Sein Zweck ist die Approximation der Gürtel defor-

mation nur insofern, als sie für die genügend genaue Vorhersage der Kontaktkräfte beim Überrollen kleiner, aber möglicherweise hoher Hindernisse erforderlich ist.

Sieht man zunächst von der Kopplung der Querbiegung von Gürtel und Karkasse in Längsrichtung ab, und beschränkt man sich auf relativ kleine Auslenkungen, dann kann die Querbiegung unter Verwendung der radialen Verschiebungsfunktion $u(s)$ durch die Balkengleichung beschrieben werden (vgl. Abb. 6):

$$EI \cdot u^{(IV)} = f_{cont} \quad (1)$$

Dabei ist f_{cont} die durch die radiale Eindrückung des Laufstreifengummis hervorgerufene Streckenlast im Kontaktbereich:

$$f_{cont}(s) = \max[0, k_{tread,radial} \cdot (z_{road}(s) - z_{contour}(s) - u(s) + h_{tread}(s))] \quad (2)$$

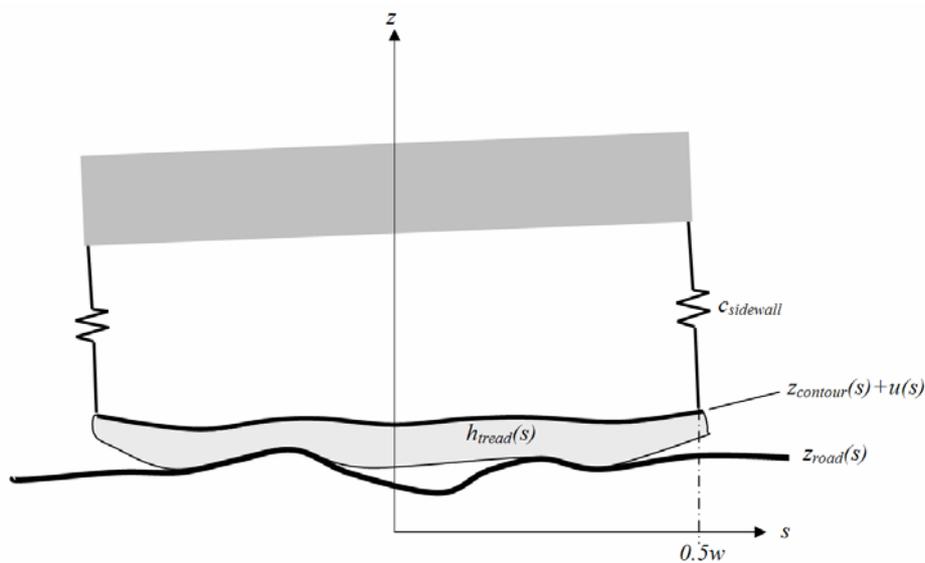


Abb. 6: Größen im Modell für die Gürtelbiegung in Querrichtung
Variables of the lateral belt bending model

$z_{contour}(s)$ bezeichnet die Mittellinie aller Gürtel- und Karkasslagen im unbelasteten Zustand, und beinhaltet Translation und Rotation der Felge (zur Vereinfachung der Darstellung wird hier, anders als in *FTire*, nicht unterschieden zwischen den verschiedenen beteiligten Koordinatensystemen: Inertialsystem, Kontaktsystem, felgenfestes Koordinatensystem und gürtelsegmentfestes Koordinatensystem).

Natürlich muss die Balkengleichung durch entsprechende Randbedingungen komplettiert werden. Außerdem ist sie in dieser Form nur stationär gültig. Bei dynamischen Simulationen kommen je ein Massen- und ein Dämpfungsterm hinzu. Obwohl (1) die geometrisch linearisierte Balkengleichung darstellt, ist die Kombination mit der unilateralen Streckenlast (2) stark nichtlinear.

In *FTire* werden diese Gleichungen iterativ gelöst, simultan mit der Integration der dynamischen Zustände im Zeitbereich. Vereinfacht ausgedrückt, werden die Gürtelverschiebefunktionen aus dem letzten Zeitschritt verwendet, um näherungsweise die Kontaktkraft f_{cont} im aktuellen Zeitschritt zu bestimmen. Die hierbei auftretende minimale Verzögerung der dynamischen Reaktion lässt sich als exakte Reaktion eines massebehafteten Balkens interpretieren.

Mit der so für jedes Gürtelsegment bestimmten Streckenlast muss nun (1) gelöst werden. Dabei handelt es sich um ein lineares Randwertproblem, dessen Lösung mit einem Ritz-Galerkin-Ansatz approximiert wird. Als Ansatzfunktionen $q_i(s)$ werden die orthonormalen Eigenfunktionen der Balkengleichung mit den entsprechenden homogenen Randbedingungen verwendet:

$$u^{approx}(s) = \alpha + \beta \cdot s + \sum_{i=1}^N \gamma_i \cdot q_i(s) \quad (3)$$

mit

$$EI \cdot q_i^{(IV)} = \lambda_i q_i \quad (4)$$

Diese Ansatzfunktionen hängen nur von der Gürtelbreite ab und können leicht angegeben werden, s. Abb. 7:

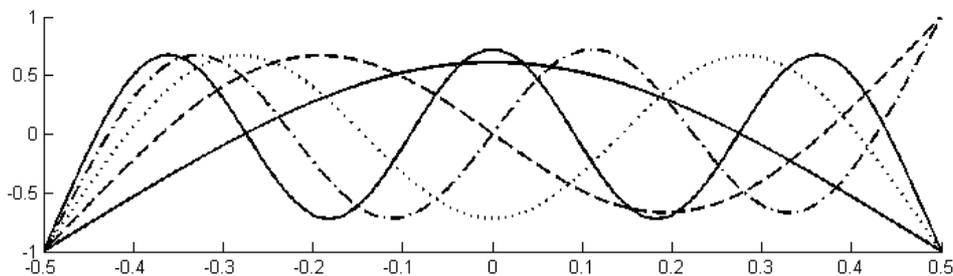


Abb. 7: Die ersten 5 Eigenlösungen $q_i(s)$ der Balkengleichung
First 5 eigensolutions $q_i(s)$ of the beam equation

Der Vorteil in der Verwendung dieser speziellen Ansatzfunktionen (statt zum Beispiel eines Polynoms oder einer trigonometrischen Summe) liegt in ihrer Orthogonalität. Diese bedingt eine bestimmte Entkopplung bei der Lösung: die Berechnung der Koeffizienten α, β, γ_i (die γ_i sind ja gerade die Werte der verallgemeinerten Freiheitsgrade) erfordert lediglich die Division der 'verallgemeinerten Last' f_i durch die Biegesteifigkeit:

$$\gamma_i = \frac{1}{EI} \int_{-0.5w}^{0.5w} f_{cont}(s) \cdot q_i(s) ds = \frac{1}{EI} f_i \quad (5)$$

Die ersten beiden Koeffizienten, die $u^{linear}(s) = \alpha + \beta \cdot s$ definieren, werden gesondert berücksichtigt. Die radiale Verschiebung α ist im detaillierten Teilmodell der radialen Gürtelsegment-Steifigkeit enthalten, und der Rotationsterm $\beta \cdot s$ ist der schon dynamisch berücksichtigte Freiheitsgrad der Gürtelsegment-Torsion.

In voller Genauigkeit ließe sich die räumliche Gürteldeformation natürlich nur durch eine nichtlineare zweidimensionale partielle Differentialgleichung anstelle der eindimensionalen Balkengleichung beschreiben. Allerdings würde die vollständige numerische Lösung dieser Schalengleichung unverhältnismäßig viel Rechenaufwand erfordern. Aus diesem Grund wird die Längskopplung der Gürtelbiegung nur wie folgt *approximiert*:

- durch die axiale Biegesteifigkeit, die die durch α beschriebene mittlere Gürtelsegmentverschiebung in Umfangsrichtung glättet,
- durch die relative Verdrehsteifigkeit zwischen zwei benachbarten Gürtelsegmenten ('twist stiffness'), die den Term $\beta \cdot s$ glättet, und
- durch eine zusätzlich eingeführte Glättung der übrigen verallgemeinerten Biege-Koordinaten γ_i^k (k bezeichnet die Nummer des Gürtelsegments).

Die zuletzt erwähnte Glättung der Biege-Koordinaten wird erreicht durch einen in (5) hinzugefügten Koppelterm, unter Verwendung eines weiteren neuen Parameters κ_i :

$$EI \cdot \left\{ \gamma_i^k + \kappa_i \cdot \left(-\gamma_i^{k-1} + 2\gamma_i^k - \gamma_i^{k+1} \right) \right\} = f_i^k \quad (6)$$

Diese Glättung wirkt in gewissem Sinne ähnlich wie ein Tiefpassfilter zweiter Ordnung im Zeitbereich. (6) beschreibt weitere, lineare, in jedem Zeitschritt zu lösende Gleichungssysteme. Die entsprechenden Systemmatrizen sind zyklische Bandmatrizen, und als solche numerisch besonders effizient zu behandeln. Für die Glättungskoeffizienten κ_i wird in der aktuellen Version jeweils der gleiche Wert verwendet, der mit dem optionalen Parameter `belt_lat_bend_stiffn_long_coupl` definiert ist.

In Abb. 8 wird der Effekt dieses Gürtelbiegemodells anhand eines Extrembeispiels demonstriert. Der Reifen wird auf ein quaderförmiges Hindernis mit der Grundfläche 20x20 mm gedrückt. Das Hindernis ist 30 mm außermittig angeordnet (nur aufgrund der geringen Auflösung der Straßendarstellung in der Animation erscheint die Grundfläche in der Abbildung nicht quadratisch). Die Bilder zeigen, bei dreifacher Überhöhung der vertikalen Auslenkung, die Gürteldeformation in verschiedenen Ansichten. In der Frontsicht ist die Form der einzelnen Gürtelbiegelinien gut zu erkennen.

Es ist zu beachten, dass bei Hindernissen mit solch kleiner Ausdehnung eine genügend große Zahl von Kontaktelementen und eine adäquate Platzierung dieser Elemente in Längs- und Querrichtung unerlässlich ist, um eine ausreichend feine geometrische Auflösung zu erzielen. Im vorliegenden Fall wurde der Gürtel in 100 Segmente unterteilt und pro Segment 80 Kontaktelemente in 40 parallelen Streifen an-

geordnet. Bei dieser Gitterfeinheit betrug die Gesamtrechenzeit 14 s pro Sekunde Simulationszeit.

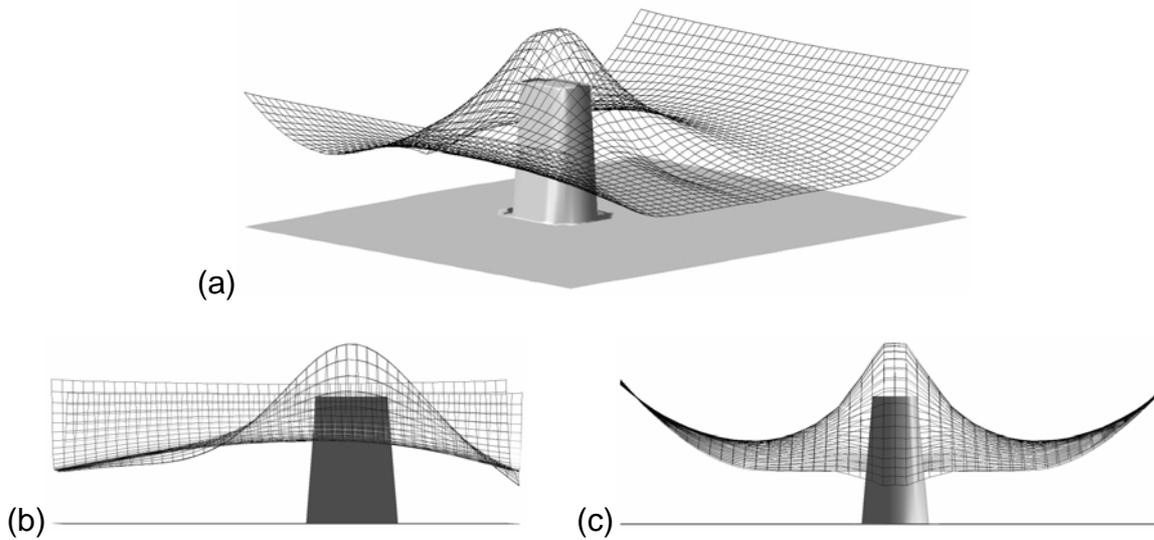


Abb. 8: Gürteldeformation in *FTire* beim Überrollen eines kleinen, aber hohen und nicht-zentralen Hindernisses (die vertikale Verschiebung ist dreifach überhöht dargestellt). Ansicht schräg von oben (a), von vorn (b) und von der Seite (c)

FTire belt distortion when tire envelopes small but high out-of-center obstacle (vertical displacement 3-fold magnified). Perspective view (a), front view (b), and side view (c)

Die Diagramme in Abb. 9 helfen bei der Beantwortung der Frage, wie viele Eigenfunktionen in der Näherungslösung der Biegebalkengleichung berücksichtigt werden sollten, mit wie vielen neuen Freiheitsgraden also die Gürtelsegmente zu versehen sind.

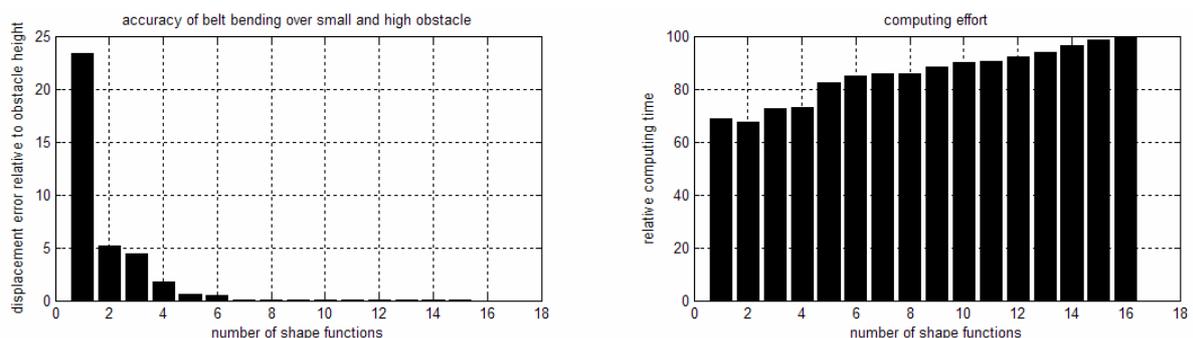


Abb. 9: Genauigkeit und Rechenaufwand des Gürtelbiegemodells in Abhängigkeit von der Anzahl der Ansatzfunktionen (Biegebalken-Eigenlösungen)
Accuracy and computing effort of belt bending model vs. number of shape functions (bending beam eigensolutions)

Es gilt, den richtigen Kompromiss zwischen Genauigkeit der Lösung und entsprechendem Rechenaufwand zu finden. Offensichtlich führen mehr als 8 Ansatzfunktio-

nen nicht mehr zu einer nennenswerten Erhöhung der Genauigkeit, während die Rechenzeit nur relativ langsam mit der Anzahl der Ansatzfunktionen wächst. Im vorliegenden Fall scheint also $N = 8$ einen akzeptablen Kompromiss darzustellen. Diese Wahl hat sich auch bei einigen anderen Experimenten bestätigt und wird deswegen allgemein empfohlen.

4 Detaillierte Querschnittgeometrie und verteilte Ungleichförmigkeiten

Wie erwähnt, sind die genaue Querschnittgeometrie von Karkasse und Gürtel sowie der Dickenverlauf im Laufstreifen wichtige Reifen-Entwurfparameter. Diese Daten beeinflussen nicht nur die Spannungsverteilung in der Reifenstruktur, sondern vor allem auch die Bodendruckverteilung. Dies gilt aus zwei Gründen: die geometrischen Eigenschaften bestimmen die Außenkontur des unbelasteten Reifens, und die Laufstreifendicke ist umgekehrt proportional zur Laufstreifensteifigkeit. Zur Analyse entsprechender Eigenschaften und Effekte mit *FTire* ist somit die detaillierte Beschreibung der Geometrie unerlässlich.

In Abschnitt 1 wurde bereits die optionale Beschreibung der Geometrie durch Tabellen von x/y -Werten angesprochen. Je eine solche Tabelle kann spezifiziert werden (1) für die Außenkontur des druckbeaufschlagten, aber ansonsten unbelasteten Reifens, und (2) für die Kontur der äußersten Karkass- bzw. Gürtellage, vgl. Abb. 1. Bei der Beschreibung der Außenkontur sind Rillen, Lamellen und andere Vertiefungen im Laufstreifen nicht zu berücksichtigen. Bei der Spezifikation der Koordinaten gibt es mehrere Alternativen und Optionen:

- es kann jeweils der gesamte, unter Umständen asymmetrische Querschnitt definiert werden, oder aber nur die linke oder rechte Hälfte. Im zweiten Fall wird der Querschnitt von der *FTire*-Einleseroutine automatisch durch Spiegelung vervollständigt,
- die Daten können auf Anforderung von der *FTire*-Einleseroutine derart skaliert und verschoben werden, dass die resultierende Außenkontur exakt zur theoretischen Reifengröße passt,
- die Interpolation der Daten kann wahlweise stückweise linear oder durch glatte parametrische Spline-Interpolation geschehen (stückweise lineare Interpolation ist jedoch nur sinnvoll bei einer ausreichend großen Anzahl von Stützstellen),
- die Daten können auf Anforderung durch polynomiale Regression geglättet werden.

Eine möglichst hohe Genauigkeit der Daten (im Bereich von 0.05 mm oder besser), oder aber die Verwendung der Glättungsoption ist wesentlich. Fehler vor allem in der Außenkontur wirken sich im Allgemeinen sehr stark auf die resultierende Bodendruckverteilung aus, die deswegen, bei verschiedenen Radlasten und Sturzwinkeln,

immer zur Überprüfung der Genauigkeit der Geometriedaten herangezogen werden sollte.

Die Bodendruckverteilung bei unterschiedlichsten Betriebsbedingungen kann sehr einfach mit dem Werkzeug *FTire/static* (Teil der Programmsammlung *FTire/tools*) berechnet und dargestellt werden.

Die Einleseroutine von *FTire* sortiert die Daten und entscheidet, ob sie zu spiegeln sind. Die x/y -Datenpaare der beiden Konturen (Gürtel/Karkasse und Außenkontur) werden unabhängig voneinander vorverarbeitet. Der Abstand der Punkte auf den Kurven muss nicht konstant sein und ist für die beiden Kurven völlig unabhängig. Das Format der Tabellendaten im *FTire*-Datenfile ist so einfach, dass es unter Verwendung eines Text-Editors mit 'Copy&Paste' aus den meisten Anwendungen (CAD, Excel™, Matlab™ usw.) ohne Schwierigkeiten übernommen werden kann.

Darüber hinaus stellt die Programmsammlung *FTire/fit*, die in Abschnitt 5 beschrieben wird, im Zusammenhang mit diesen Geometriedaten zwei komfortable Werkzeuge bereit:

- ein Werkzeug zur Digitalisierung der Konturen aus eingescannten Querschnittzeichnungen, und
- ein Werkzeug zur Visualisierung aller relevanten Geometriedaten eines *FTire*-Datenfiles durch einen einzelnen Maus-Klick, vgl. Abb. 10.

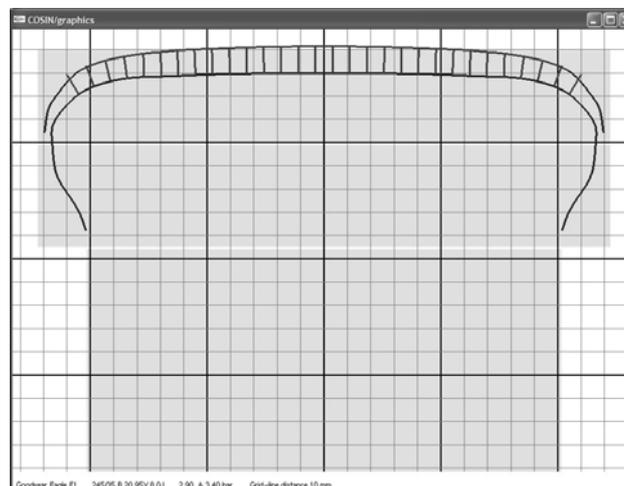


Abb. 10: Visualisierung der Querschnittgeometrie und der Position der Kontaktelemente in *FTire/fit*
Visualization of cross section geometry and contact element placement in FTire/fit

Die grauen Flächen in der grafischen Ausgabe dieses Visualisierungswerkzeuges (s. Abb. 10) deuten die theoretischen Größen von Reifen und Felge an, wie sie sich aus den entsprechenden Größenangaben ergeben würden. Sie können zur Überprüfung der Plausibilität der Konturdaten herangezogen werden. Das Werkzeug stellt außer-

dem in unterschiedlichen Farben die Konturen von Karkasse/Gürtel, die Außenkontur (beide nach der Vorverarbeitung), sowie Position und Richtung der Kontaktelemente dar.

Eine weitere Neuentwicklung in *FTire* gestattet die detailliertere Beschreibung von Reifenungleichförmigkeiten. Tabellendaten der entsprechenden Imperfektionen können als Funktion des Umfangswinkels in das Datenfile aufgenommen werden. Diese Daten müssen nicht notwendig äquidistant sein, und können wahlweise stückweise linear oder als glatter Spline mit periodischen Randbedingungen interpoliert werden.

Auf diese Art können optional folgende Imperfektionen definiert werden:

1. radiale Ungleichförmigkeit (Variation der Radialsteifigkeit),
2. tangentielle Ungleichförmigkeit (Variation der Längssteifigkeit),
3. Höhenschlag (Variation des maximalen Radius),
4. Massenvariation, und
5. Profiltiefenvariation.

Im Fall der detaillierten Vorgabe von Höhenschlag, Massenvariation oder Profiltiefenvariation wird von *FTire* während der Vorverarbeitungsphase der Reifen statisch ausgewuchtet. Dies ist praktisch, wenn man den dynamischen Einfluss einer allgemeinen Massenvariation vom 'klassischen' Effekt einer statischen oder dynamischen Unwucht trennen will. Übrigens lassen sich beide Ungleichförmigkeitstypen auch simultan definieren und analysieren.

Die Werkzeugsammlung *FTire/tools* enthält ein weiteres Programm, das mit wenigen Maus-Klicks alle spezifizierten Ungleichförmigkeiten in Diagrammform (mit dem Umfangswinkel als unabhängige Größe) darstellen kann.

5 Erfahrungen mit der Parametrierung. Das neue *FTire/fit*

In letzter Zeit lag der Schwerpunkt der Weiterentwicklung von *FTire* bei *FTire/fit*, dem Programmpaket für messungsgestützte Parametrierung. Diese Weiterentwicklung wurde stark beeinflusst von eigenen Erfahrungen bei der Anwendung. Sie führten zu einem besseren Verständnis

1. der Relevanz bestimmter Klassen von Messungen,
2. der richtigen Reihenfolge, in der aus diesen Messungen *FTire*-Parameter bestimmt werden sollten,
3. der Relevanz bestimmter Messungen für bestimmte Parameter,
4. der Plausibilität von Wertebereichen für Parameter,

5. der Sensitivität von Parametern bezüglich resultierender Modelleigenschaften,
6. und allgemein der Möglichkeiten zur Verbesserung der Benutzerfreundlichkeit.

Eine wichtige Erfahrung betrifft zum Beispiel die Rolle **modaler** Daten. Vereinfacht ausgedrückt, scheinen diese weniger aussagekräftige Informationen zu liefern als **statische** Messungen - dies steht im Widerspruch zu den Annahmen, die ursprünglich bei einer ersten Konzeption der *FTire*-Parametrierung gemacht wurden. Außerdem ist der Messtechnikaufwand zur Bestimmung modaler Daten recht hoch.

Es gibt einen anschaulichen Grund für diesen Mangel an relevanter Information: bei modalen Messungen werden immer nur kleine Schwingungsamplituden erreicht. Diese Messungen werden dann aber verwendet, um das Modell zum Einsatz bei großen oder sogar extremen Deformationen zu parametrieren. Im Falle starker Nichtlinearitäten ist der Schluss von kleinen auf große oder extreme Auslenkungen kaum möglich. Natürlich spiegeln aber auch statische Messungen mit großen Deformationen nicht alle Eigenschaften wieder. Alle Arten von Dämpfung (abgesehen vielleicht von echter Hysterese), dynamische Materialverhärtung und Masseneigenschaften müssen anderweitig identifiziert werden.

Eine weitere Erfahrung betrifft den Nutzen von **Latschabdrücken** in Form von eingescannten Bitmaps. Solche Abdrücke enthalten eine Vielzahl wertvoller Informationen: Länge, Breite, Ausrundung, und die Abhängigkeit von Radlast und Sturzwinkel lassen sich zum Beispiel hervorragend verwenden, um Gürtelbiegesteifigkeiten zu identifizieren und die Querschnittkontur zu validieren. Noch wertvoller werden Latschabdrücke natürlich, wenn sie zusätzlich, farb-kodiert, die Bodendruckverteilung beinhalten.

Als ähnlich leicht zu beschaffen und gut verwertbar zeigen sich statische Einfelderkennlinien (Vertikalkraft über Einfeldung) ohne und mit Sturzwinkel, auf ebenem Untergrund oder auf Hindernissen mit wohldefinierter Geometrie. Auch Standardmessungen wie Seitenkraft- und Rückstellmomenten-Kennlinien, bzw. die daraus abgeleiteten Kenngrößen wie Seitenkraftbeiwert und pneumatischer Nachlauf, zeigen oft eine erstaunliche Korrelation zu wenigen Modellparametern.

In vielen Fällen bleibt nach einer sorgfältigen Analyse und Auswertung dieser statischen und stationären Messungen nur ein kleiner Rest dynamisch relevanter Parameter übrig, der dann mit Hilfe von Schlagleistenüberfahrten identifiziert wird. Schlagleistenüberfahrten stellen die einfachste und wichtigste Methode dar, den Reifen in einem realistischen Betriebszustand und unter genau bekannten Randbedingungen dynamisch anzuregen.

Der im Folgenden grob skizzierte Ablauf einer Parametrierung war in der Vergangenheit bei vielen Parametrierungsprojekten erfolgreich. Er wird von *FTire/fit* in allen 8 Phasen weitreichend unterstützt.

Phase 1: Vorbereitung

1. Generierung eines neuen Datenfile mit Hilfe von *FTire/estim* (s. Abb. 11), nach Spezifikation der Reifen- und Felgenreöße, des Lastindex, des Geschwindigkeitssymbols, der Masse und des Fülldrucks. Als Referenzreifen sollte ein Reifen verwendet werden, der in Größe und Typ so nahe wie möglich dem zu parametrierenden Reifen kommt. *FTire/estim* wird direkt aus der *FTire/fit*-Benutzeroberfläche heraus aufgerufen.

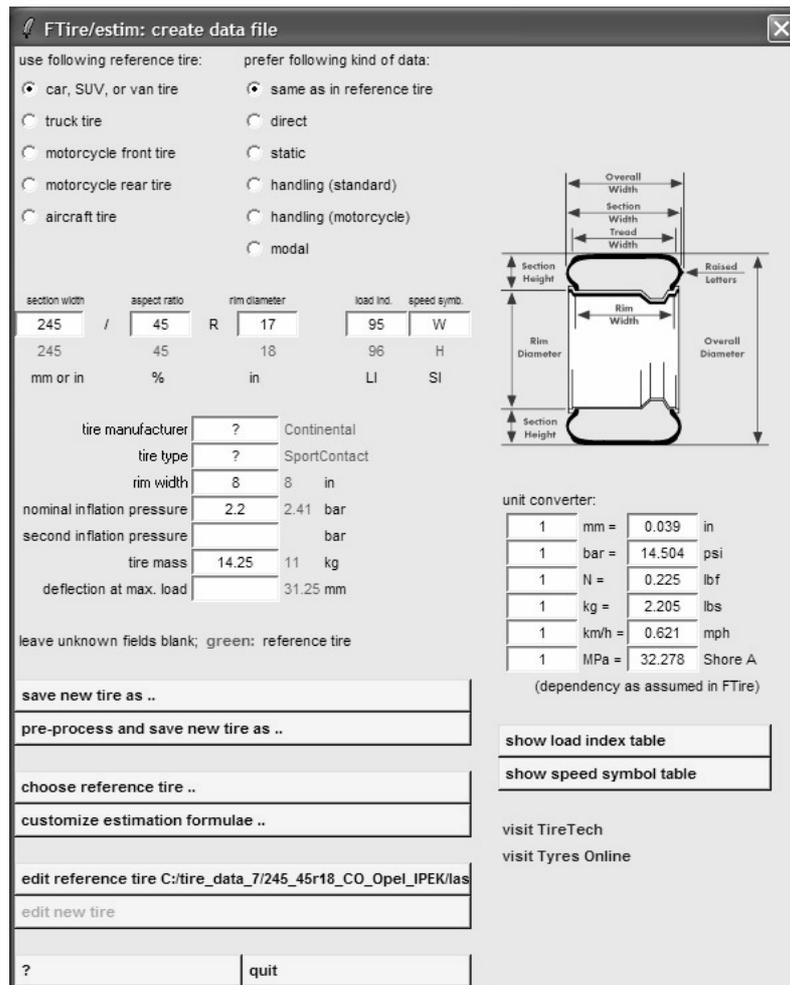


Abb. 11: Benutzeroberfläche von *FTire/estim*
FTire/estim user interface

2. Spezifikation der Geometriedaten aller Trommelprüfstände und Schlagleisten, die während der folgenden Identifikation und Validierung verwendet werden. *FTire/fit* stellt Beispieldateien zur Geometriebeschreibung sowie Funktionen zur Verwaltung dieser Dateien bereit.
3. Spezifikation aller statischen, stationären und dynamischen Messungen, die während der folgenden Identifikation und Validierung verwendet werden. Falls die entsprechenden Messwertdateien im TYDEX-Format (vgl. [9]) vorliegen, ist hierzu oft nur ein einziger Mausklick notwendig. *FTire/fit* erkennt automa-

tisch, welche Art von Messung in der Datei aufgezeichnet ist, extrahiert die entsprechenden konstanten Betriebsbedingungen wie aktueller Fülldruck, Radlast, Sturzwinkel usw., und speichert in einer Konfigurationsdatei Informationen, wie die zugehörige Identifikation oder Validierung durchzuführen ist. Darüber hinaus, soweit bei der entsprechenden Messung sinnvoll, extrahiert *FTire/fit* ohne Zutun des Anwenders relevante weitere Information, wie Radialsteifigkeit, Längssteifigkeit, Quersteifigkeit, Torsionssteifigkeit, Seitenkraftbeiwert, pneumatische Nachlaufstrecke, Sturz-Seitenkraftbeiwert, Gleitreibungskoeffizient usw., und speichert diese Daten in Form 'nominaler' Werte im Reifendatenfile. Falls die Messwertdatei in einem anderen ASCII-Format vorliegt, assistiert *FTire/fit* sehr weit reichend beim Import. Dazu werden unter anderem Möglichkeiten zur Skalierung, zur Umrechnung von Einheiten und Koordinatensystemen, und zur Verknüpfung mehrerer Messkanäle durch arithmetische Ausdrücke angeboten. Liegt die Messung nur in Form eines gescannten Diagramms vor, stellt *FTire/fit* eine einfach zu bedienende Digitalisierungsfunktion zu Verfügung, die auf MSPaint™ basiert und ohne zusätzliche Hardware auskommt.

4. Spezifikation aller verfügbaren Bitmap-Files von Latschabdrücken. *FTire/fit* bestimmt den Skalierungsfaktor und speichert weitere relevante Informationen, wie Radlast und Sturzwinkel, als Randbedingungen für die spätere Validierung.

Phase 2: Geometrie

Import oder Digitalisierung der Konturen von Karkasse/Gürtel und Laufstreifen (vgl. Abschnitt 4). Wie oben erwähnt, stellt *FTire/fit* entsprechende Digitalisierungs- und Visualisierungswerkzeuge bereit.

Phase 3: Dynamischer Rollradius

Identifikation des dynamischen Rollradius auf Basis der Messungen der Winkelgeschwindigkeit des frei rollenden Reifens bei verschiedenen Trommelgeschwindigkeiten und Radlasten. Falls solche Messungen nicht vorliegen, kann der dynamische Rollradius grob durch den mittleren Gürtelradius approximiert werden.

Phase 4: Statische Eigenschaften

Identifikation oder Validierung folgender statischer Eigenschaften:

1. Vertikalsteifigkeit auf ebenem Untergrund. Dies ist eigentlich nur die Überprüfung der zwei Einfederungswerte bei halber und voller LI-Last = Reifen-Tragfähigkeit, die von *FTire/fit* schon in Phase 1 automatisch bestimmt und im Datenfile eingetragen worden sind. Der entsprechende dynamische Simulationsfall wurde von *FTire/fit* vorbereitet und kann mit einem einzigen Maus-Klick gestartet werden. Falls die aktuelle Steifigkeit des *FTire*-Modells von der nominalen abweicht, können die Einfederungswerte leicht angepasst werden.

Wegen der unterschiedlichen Behandlung von Hysterese und Reibung bei statischer und dynamischer Simulation können solche kleineren Diskrepanzen auftreten.

2. Längs- und Quersteifigkeit auf ebenem Untergrund (es gelten sinngemäß die gleichen Bemerkungen wie bei der Vertikalsteifigkeit).
3. Torsionssteifigkeit (Anfangssteifigkeit beim Drehen des stehenden Reifens um die Hochachse wie beim Parkieren). Bemerkungen wie bei der Vertikalsteifigkeit. Anpassung der Gürtel-Torsionssteifigkeit um die radiale Achse bei Diskrepanzen zwischen Simulation und Messung.
4. Vertikalsteifigkeit auf quer und längs orientierter Schlagleiste. Anpassung der Gürtelbiegesteifigkeit in axialer Richtung bzw. in Querrichtung bei Diskrepanzen zwischen Simulation und Messung.
5. Vertikalsteifigkeit bei großem Sturzwinkel auf ebenem Untergrund und auf quer orientierter Schlagleiste. Anpassung der Gürtel-Torsions- und Verdrehsteifigkeit um die Längsachse bei Diskrepanzen zwischen Simulation und Messung.
6. Größe und Form des Latschabdrucks bei verschiedenen Radlasten und, falls verfügbar, Sturzwinkeln. *FTire/fit* hat die entsprechenden Simulationen in Phase 1.4 vorbereitet, und überlagert als Ausgabe in den Bitmap-Dateien den gemessenen Abdruck mit der Berandung des simulierten Abdrucks, vgl. Abb. 4. Anpassung der Gürtelbiegesteifigkeit in axialer Richtung bzw. in Querrichtung, sowie unter Umständen der Gürteltorsionssteifigkeit um die Längsachse bei Diskrepanzen zwischen Simulation und Messung. Dabei muss eventuell ein Kompromiss mit den Ergebnissen aus 4. und 5. gefunden werden.

Phase 5: Handling-Eigenschaften

Identifikation oder Validierung folgender Handling-Eigenschaften:

1. Umfangssteife (Anfangssteigung der Umfangskraftkennlinie als Funktion des Längsschlupfes). Dazu kann entweder der nominale Wert im Datenfile als Vorgabewert aktiviert werden (dieser Wert ist eine Alternative für die Vorgabe der Profilgummisteifigkeit), oder die Profilgummisteifigkeit muss manuell angepasst werden. *Fire/fit* hat die Simulation in Phase 1.3 vorbereitet, falls eine entsprechende Messung vorliegt.
2. Seitenkraftbeiwert und pneumatische Nachlaufstrecke. Dazu können entweder die nominalen Werte im Datenfile als Vorgabewerte aktiviert werden (diese Werte sind Alternativen für die Vorgabe der Quersteifigkeit und der Biegesteifigkeit um die radiale Achse), oder die beiden Steifigkeiten können manuell angepasst werden. Dabei muss eventuell ein Kompromiss mit den Ergebnissen aus Phase 4.2 gefunden werden. *Fire/fit* hat die Simulation in Phase 1.3 vorbereitet, falls eine entsprechende Messung vorliegt.

Phase 6: Reibkennfeld

Identifikation der Gleitreibungskoeffizienten. Während des 'Eincheckens' der Messungen in Phase 1.3 hat *FTire/fit* automatisch alle verfügbaren und relevanten Informationen hierzu gesammelt und zur weiteren automatisierten Auswertung gespeichert. Im günstigsten Fall genügen zur Identifikation des entsprechenden Reibkennfeldes wenige Maus-Klicks. Nach dieser Identifikation werden die entsprechenden Messungen durch dynamische Simulation validiert.

Folgende Fälle werden von *FTire/fit* in den Messungen erkannt und ausgewertet: (a) Ziehen des blockierten Rades in Längsrichtung, (b) Ziehen des Rades in Querrichtung, (c) Drehen des Rades um die Hochachse, (d) Rollen mit großen Längsschlupf, und (e) Rollen mit großem Schräglaufwinkel.

Falls nach der Identifikation die Haft- und Gleitreibungskoeffizienten sehr unterschiedlich sind, können in der dynamischen Simulation Stick-Slip-Effekte auftreten. In solchen Fällen muss, durch Modifikation der Reibungskoeffizienten, ein Kompromiss zwischen stationärer Genauigkeit und dynamisch realistischem Verhalten gefunden werden.

Phase 7: Dynamische Eigenschaften in Vertikal- und Längsrichtung

Durchführung der Zeit- und Frequenzbereichs-Identifikation für die 'symmetrischen' Schlagleisten-Tests (Anregung nur in Vertikal- und Längsrichtung) zur Bestimmung weniger noch nicht spezifizierter Parameter, wie: schwingfähiger Massenanteil, strukturelle Dämpfung, Längskopplung der Profilgummi-Schersteifigkeit, Profilgummidämpfung usw.

Phase 8: Dynamische Eigenschaften in Querrichtung

Durchführung der Zeit- und Frequenzbereichs-Identifikation für die 'asymmetrischen' Schlagleisten-Tests (Anregung auch in Querrichtung) zur Bestimmung weiterer noch nicht spezifizierter Parameter, die bei symmetrischer Anregung nicht relevant sind, wie: strukturelle Dämpfung in Querrichtung, kinematische Kopplung von Gürteltorsion um Umfangsrichtung und Gürtelquerauslenkung, kinematische Kopplung von radialer Gürtelbiegung und Gürteltorsion um Umfangsrichtung, usw.

In den Phasen 4 bis 8 werden von *FTire/fit* Diagramme erstellt, die den jeweiligen Vergleich zwischen Messung und Rechnung darstellen. Zusammen mit weiteren berechneten Eigenschaften und Kenngrößen des resultierenden *FTire*-Modells werden diese zum Schluss der Parametrierung auf Anforderung des Anwenders zu einem umfassenden Report im pdf-Format zusammengefasst. Während der Parametrierung stellt *FTire/fit* über die erwähnten Komponenten hinaus eine Vielzahl von weiteren unterstützenden Analyse-Werkzeugen zur Verfügung.

6 Neue Straßenmodelle. Das 'Regular Grid'-Format

Umfassende Erfahrung in der industriellen Anwendung und Nutzerberatung von *FTire* zeigen, dass zwei Aspekte für die meisten Anwender von besonderer Bedeutung sind: (1) Aufwand, Kosten, Genauigkeit und Zuverlässigkeit der **Parametrierung**, vgl. Abschnitt 5, und (2) Möglichkeit und Aufwand der Kopplung von *FTire* mit externen **Straßenmodellen** der unterschiedlichsten Herkunft, Implementierung und Komplexität.

Der zweite Aspekt ist vor allem essentiell beim Einsatz von *FTire* innerhalb von Lebensdauerberechnungen. In solchen Anwendungen wird ein Reifenmodell dazu verwendet, basierend auf einem meist gemessenen Straßenhöhenprofil die dynamischen Radlasten vorherzusagen. Diese werden anschließend als Zeitreihen in der Lebensdauerberechnung auf das detaillierte FE-Modell der Radaufhängung aufgeprägt. Das Reifenmodell selbst steht dabei nicht im Mittelpunkt des Interesses. Vielmehr ist die MKS-Simulation des Systems Fahrzeug/Fahrwerk/Reifen nur eine Vorverarbeitungsphase, um Kräfte aus Geometriedaten (dem Straßenprofil) zu generieren.

Mit anderen Worten: die Fähigkeit, eine große Klasse von Straßendatenformaten zu importieren und effizient zu verarbeiten, ist eine der wichtigsten Eigenschaften eines dynamischen Reifenmodells.

Bei der Entwicklung von *FTire* wurde diesem Aspekt durch den Einsatz einer sehr einfachen Schnittstelle zu externen Straßenmodellen Rechnung getragen. Über diese Schnittstelle wurden, unter anderem, folgende Straßenmodelle eingebunden:

1. alle MSC.ADAMS™ Straßendateien (rdf-Files), einschließlich aller 2D- und 3D-Methoden, xml-Dateien, ARC-Modelle und Motorsport-Straßenmodelle,
2. alle extern programmierten Straßenmodelle, die das 'TYDEX/STI Standard Road Description Interface' verwenden, vgl. [9],
3. alle extern programmierten Straßenmodelle, die die von *FTire* vorgegebene einfache Schnittstellenkonvention beachten ('user-defined road models', vgl. [4]),
4. triangulierungsbasierte 3D-Daten im WaveFront-Format (obj-Format),
5. alle *COSIN/ev*-Straßendateien ('COSIN Environment Description Routines', vgl. [4]),
6. FTR-Straßendateien der *vi-Grade GmbH* (s.u.),
7. CRG-Straßendateien von *DaimlerChrysler AG* und *TÜV SÜD AG* (s.u.),
8. mehrere proprietäre Straßenmodelle industrieller Anwender.

Einige der Modelle in 1. und 6. benötigen eine entsprechende Lizenz des jeweiligen Anbieters; die Modelle in 8. sind nicht allgemein verfügbar. Alle anderen Modelle können ohne weiteres zusammen mit allen Implementierungen von *FTire* verwendet werden, unabhängig vom aufrufenden MKS-Programm. Das Straßenmodell wird nämlich immer nur von einer *FTire*-Routine aufgerufen. Das MKS-Programm selbst benötigt Straßendaten allenfalls im Animationsfenster. Ist das Straßendatenformat im MKS-Programm unbekannt, wird hier eine ebene Straße dargestellt. Im *FTire*-Animationsfenster erscheint dagegen die richtige Straßendarstellung.

Ein wichtiger Aspekt bei Straßenmodellen ist die Rechenzeit zur Auswertung der Straßenhöhe. *FTire* benötigt die Höhe in jedem Zeitschritt für jedes Laufstreifenelement, das einen 'Kandidaten' für möglichen Kontakt darstellt. Deswegen kann die Anzahl der benötigten Straßenauswertungen leicht eine Million pro Sekunde Simulationszeit überschreiten.

Vor diesem Hintergrund stellt sich heraus, dass triangulierungs-basierte Modelle, trotz ihrer hohen Flexibilität und ihrer hervorragenden Möglichkeiten zur lokalen Netzverfeinerung, nicht immer optimal geeignet sind für detaillierte Reifenmodelle. Das 'aktive' Dreieck, über dem sich das Kontaktelement gerade befindet, ist nämlich nicht a priori bekannt und muss durch relativ aufwendige Dreiecksberechnungen gesucht werden. Dies kann auch in *FTire* zu einer deutlichen Erhöhung der Gesamt-Rechenzeit führen, obwohl hier rechenzeitoptimierte Suchstrategien für das aktive Dreieck eingesetzt werden.

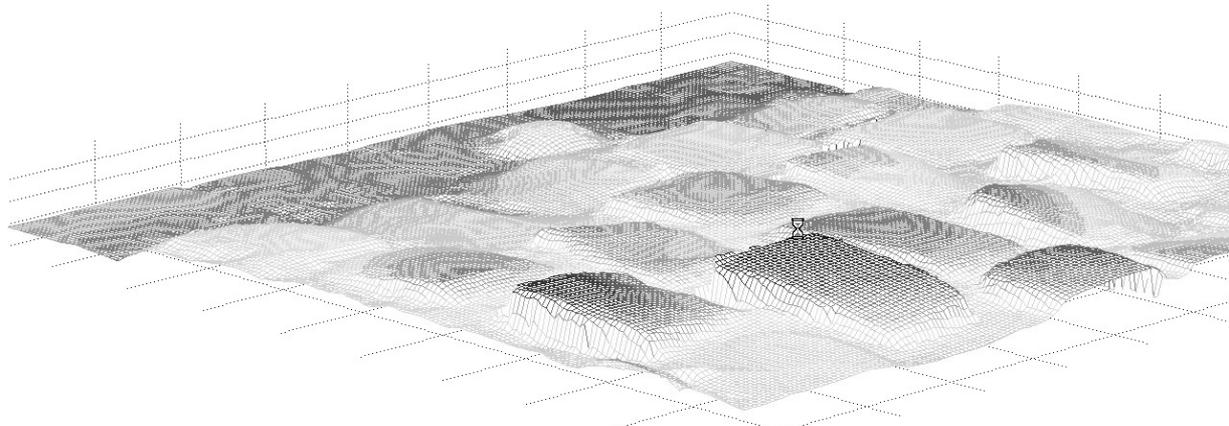


Abb. 12: Abschnitt einer Kopfsteinpflaster-Straße, beschrieben mit einer Straßendatei im RGR-Format

Section of a Belgian block road, described by an RGR road data file

Als Konsequenz wird bei großen Datenmengen die Verwendung eines optimierten Straßenmodells vorgeschlagen, basierend auf einem Rechteckgitter in der x/y -Ebene mit konstanter Gitterweite. Dieses Straßenmodell heißt 'Regular Grid Road' (RGR), vgl. Abb. 12 und [4]. Wegen der konstanten Gitterweite entfällt bei der Auswertung die Suche nach dem aktiven Dreieck. Vielmehr kann die aktive Position im Gitter leicht aus den x/y -Koordinaten des Kontaktpunktes berechnet werden. Außerdem ist

das Dateiformat wesentlich einfacher, da die aufwendige Speicherung der Topologie der Triangulierung entfällt.

Allerdings lässt das RGR-Modell naturgemäß keine lokale Gitterverfeinerung zu. Für Straßen, die nur aus wenigen, weit verstreuten Einzelhindernissen bestehen, kann eine triangulierungsbasierte Darstellung unter Umständen viel Speicherplatz einsparen.

Datenfiles für das RGR-Modell gibt es in drei Format-Varianten, die im Wesentlichen äquivalent sind. Die in *FTire* verwendete Auswerterroutine ist in allen drei Fällen, abgesehen von der Vorverarbeitung der Daten, identisch:

1. *FTire*'s eigene RGR-Version, die unten beschrieben wird,
2. FTR-Straßenfiles, eine RGR-Implementierung, die gemeinsam mit *vi-Grade GmbH* entwickelt wurde,
3. CRG-Straßenfiles, die von der Forschung der *DaimlerChrysler AG* zusammen mit der *TÜV SÜD AG* definiert und mit einem eigens hierfür entwickelten Messfahrzeug durch laseroptische Messungen erstellt werden können (vgl. www.tuev-sued.de/3D-Track).

RGR-Straßenfiles speichern nur die z-Werte der Straßenoberfläche in den Gitterpunkten eines äquidistanten x/y -Gitters. Das Zahlenformat kann sowohl binär als auch formatiert sein. Ein verlustfreier Kompressionsalgorithmus ist verfügbar, der eine starke Reduktion der Dateigröße bewirkt, wenn größere Abschnitte der Straße eben sind. Somit ist nicht nur der Rechenaufwand bei der Auswertung, sondern auch der Speicherplatzbedarf optimal.

RGR-Straßen können auch mit einer gekrümmten Mittellinie definiert werden, Abb. 13. Eine solche Mittellinie wird mit Hilfe einer separaten Tabelle von x/y -Werten mit beliebigem Abstand (unabhängig von der Gitterweite) definiert, und wird durch parametrische Spline-Interpolation ausgewertet.

Die Kombination mit den Gitterdaten ist wie folgt realisiert: die Mittellinie definiert die gekrümmte x -Achse des Gitters. Die Abstände Δx der Gitterlinien längs dieser Mittellinie sind konstant. Die x -Koordinaten starten mit dem Wert 0 am Beginn der Straße, der durch den ersten Punkt der Mittellinie definiert wird. Die y -Koordinate eines Gitterpunktes wird durch den Abstand des Gitterpunktes von der Mittellinie definiert. Punkte mit positiven y -Werten liegen links von der Mittellinie, wenn man in Richtung anwachsender x -Werte schaut.

Um eine wohldefinierte und eindeutige Auswertung für alle Punkte innerhalb des Gitters zu erhalten, dürfen keine Gitterüberschneidungen vorkommen. Dies ist der Fall, wenn der minimale Krümmungsradius der Mittellinie größer ist als die halbe Gitterbreite.

Die Mittellinie selbst darf zusätzlich mit einem Höhen- und Querneigungsverlauf ausgestattet sein. In diesem Fall werden die z-Werte des Gitters und die durch die Mittellinie definierten z-Werte addiert.

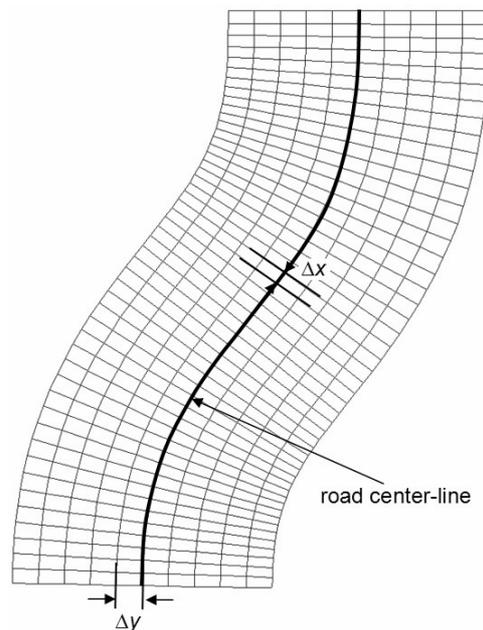


Abb. 13: RGR-Straßen: Gitter mit gekrümmter Mittellinie
Curvilinear mesh of RGR roads

RGR-Straßendateien haben längst ihre Effizienz und Eignung beim produktiven Einsatz bewiesen, teilweise mit riesigen Datenmengen von bis zu $2.6 \cdot 10^8$ Gitterpunkten. Die Programmsammlung *FTire/tools* beinhaltet ein einfach zu bedienendes 3D-Visualisierungstool für RGR-Dateien (und auch für alle anderen Straßendateiformate), sowie ein Werkzeug zur Umwandlung beliebiger Straßendateien in das RGR-Format.

7 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurden aktuelle Erweiterungen des Reifensimulationsmodells *FTire* und der zugehörigen Programmwerkzeuge vorgestellt. Im einzelnen handelt es sich um (1) Modellverfeinerungen, die die Anwendung von *FTire* bei Motorradreifen mit extremen Sturzwinkeln ermöglichen, (2) Modellverfeinerungen, die die Gürtel deformation und damit die Kräfte beim Überrollen von hohen Hindernissen mit sehr kleiner Grundfläche genauer berechnen, (3) die verfeinerte Beschreibung unterschiedlichster Reifenimperfectionen, (4) die Vorgabe der Querschnittskontur durch CAD-Daten, verbunden mit einer genaueren Simulation der Aufstandsfläche und der Bodendruckverteilung, (5) neue und leistungsfähige Werkzeuge zur Parametrierung, und (6) effiziente neue Modelle für die 3D-Straßenbeschreibung.

Dieser Beitrag ist jedoch nur ein Zwischenbericht zum momentanen Stand von *FTire*. Die Entwicklung schreitet weiter voran; die Vorhersagequalität bei existierenden An-

wendungen wird durch Modellverfeinerungen weiter verbessert, und es werden neuartige Anwendungen erschlossen werden. Einige Pläne für die nahe Zukunft sind zum Beispiel:

- Verwendung einer zweidimensionalen Greenschen Funktion für die Gürteldeformation in der Nähe der Aufstandsfläche, und damit eine sehr viel genauere Lösung der linearisierten partiellen Differentialgleichung der orthotropen Schale, anstelle des in Abschnitt 3 beschriebenen Ansatzes,
- Implementierung einer optionalen zweidimensionalen Variation der Laufstreifenfendicke als allgemeingültigste Darstellung dieser Imperfektion,
- noch weiter reichende Automatisierung in *FTire/fit*,
- Implementierung einer Technik des dynamischen Ladens und Entladens von Teilbereichen der Gitterdaten bei RGR-Straßen, um noch längere Straßenabschnitte oder noch feinere Auflösungen zu ermöglichen,
- die Ankopplung von *FTire* an viskoelastische Bodenmodelle, einschließlich der Definition und Implementierung einer geeigneten, möglichst allgemeingültigen Schnittstelle.

8 Literatur

- [1] DORFI, H.R.
A Study of the In-Plane Force Transmission of Tires
Tire Science and Technology, TSTCA Vol. 32, Nr. 4, 2004, pp. 188-213
- [2] DORFI, H.R.
Tire Non-Uniformities And Steering Wheel Vibrations
Tire Science and Technology, TSTCA Vol. 33, Nr. 2, 2005, pp. 64-102
- [3] GIPSER, M.
ADAMS/FTire – A Tire Model for Ride & Durability Simulations
Proc. ADAMS User's Conference
Tokyo, 2000 (verfügbar zum Download von <http://www.ftire.com>)
- [4] GIPSER, M.
FTire-Dokumentation und *FTire*-Demoversionen
<http://www.ftire.com>
- [5] LIEVEN, W.; WARNECKE, U.; TRAN-QUOC, T.
Virtuelle Dauerlaufauslegung von PKW-Karosserien (Virtual Durability Dimensioning of Passenger Car Bodies)
VDI-Berichte Band 1846, 2004, pp. 437-448

-
- [6] LUGNER, P.; PACEJKA, H.; PLÖCHL, P.
Recent Advances in Tyre Models and Testing Procedures
Vehicle System Dynamics Vol. 43, 2005, pp. 413-436
- [7] PACEJKA, H.B.
Tyre and Vehicle Dynamics
Butterworth and Heinemann, Oxford, 2002
- [8] RIEPL, A.; REINALTER, W.; FRUHMANN, G.
Rough Road Simulation with Tire Model RMOD-K and *FTire*
Proc. 18th IAVSD Symposium, Kanagawa Inst. of Tech., Atsugi-shi, Japan, 2003
- [9] VAN OOSTEN, J.J.M.; UNRAU, H.J.; RIEDEL, G.; BAKKER E.
TYDEX Workshop: Standardisation of Data Exchange in Tyre Testing and Tyre Modelling. In: Tyre Models for Vehicle Dynamic Analysis
Supplement to Vehicle System Dynamics, Vol. 27. Swets&Zeitlinger Lisse, 1997