

Reifenmodelle in der Fahrzeugdynamik: eine einfache Formel genügt nicht mehr, auch wenn sie magisch ist

Dr. Michael Gipser, FH Esslingen, Fachbereich Fahrzeugtechnik

1. Einleitung

Dieser Beitrag diskutiert die Anforderungen an moderne Reifenmodelle im Zusammenhang mit MKS-Simulationen von Chassis und Gesamtfahrzeug. Vor dem Hintergrund dieser Betrachtungen wird dann das Reifenmodell *FTire* des Autors vorgestellt. Dieses Modell soll vor allem die Lücke zwischen, meist physikalisch orientierten, reinen Schwingungsmodellen, und ‚empirischen‘ Handlingmodellen schließen. Es werden die Modellbildung, Implementierung, Performance und Datenbeschaffung diskutiert. Anhand einiger Simulationsergebnisse wird die bisher erreichte Modellgüte aufgezeigt.

2. Reifenmodelle in MKS-Simulationen

Gesamtfahrzeug- und Fahrwerkmodelle haben heute, auf der Basis von Mehrkörpersystemen, einen Detaillierungsgrad erreicht, von dem man vor einigen Jahren nur träumen konnte. So werden heute selbstverständlich, zusätzlich zu den reinen MKS-Elementen wie

- Starrkörper,
- nichtlineare Krafterelemente wie Federn, Dämpfer und Bushings und
- kinematische Bindungen

auch

- komplizierte Materialeigenschaften der Gummilager,
- nichtlineare dynamische Hydrolager,
- die Hydraulik der Servolenkung,
- detaillierte fluiddynamische Stoßdämpfermodelle,
- semi-aktive und aktive Federungselemente,
- genaue Modelle der Mechanik, Hydraulik und Elektronik der Bremsen,
- flexible Körper (wie Querlenker, Blattfedern und Fahrschemel),

und viele andere, systemdynamisch komplizierte Komponenten in das Gesamtmodell einbezogen.

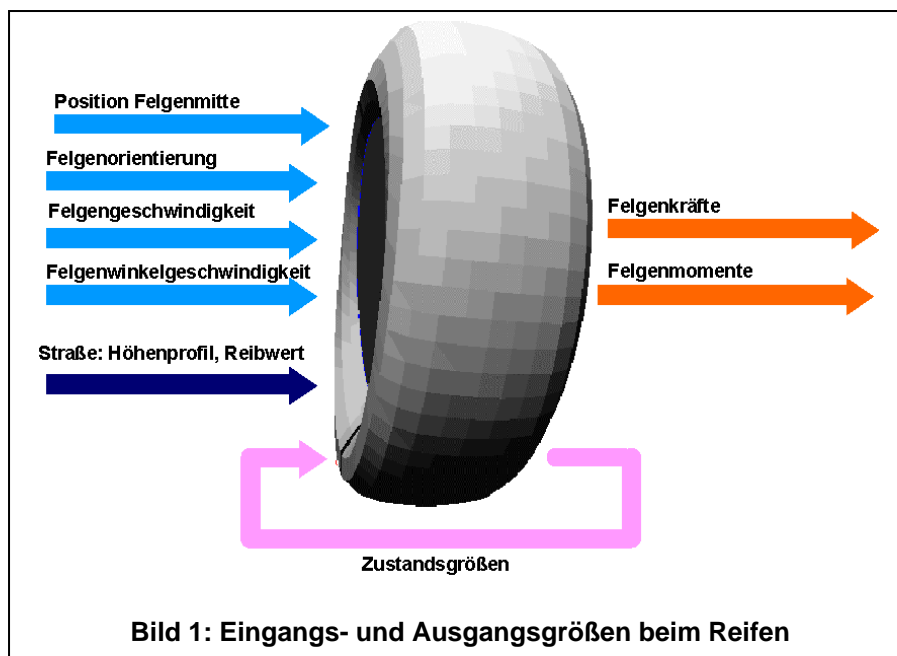
Möglich macht dies, bei akzeptablen Rechenzeiten, vor allem die rasante Entwicklung der Rechnerleistungen. So berechnet heute ein normaler PC für weniger als 2k€, bei einem Prozessortakt von 1 GHz, **pro Millisekunde** mehr als **120 000 doppelt-genaue Elementaroperationen** der Form $a=b+c*d$. Bei einer solchen, fast unvorstellbaren, Leistung sollten sich viele, auch detaillierte Modelle in Echtzeit integrieren lassen.

Angesichts der hohen Modellierungsgüte der Fahrwerkmodelle stellt sich heute mehr denn je die Frage nach der geeigneten Reifenbeschreibung. Es ist klar, dass der Rei-

fen wie kein anderes Teilsystem die Ergebnisse der Fahrwerksimulation beeinflusst, und gleichzeitig das vielleicht komplizierteste (und in seiner Dynamik am wenigsten verstandene) Teilsystem darstellt.

Es ist sicher nicht immer erforderlich, den genauen Entstehungsmechanismus der Reifenkräfte zu kennen, also eine physikalische Modellvorstellung zu haben. Dies gilt jedenfalls dann, wenn nicht der Reifen selbst durch die Simulation besser verstanden oder gar optimiert werden soll. Wenn man, abhängig von den momentanen Betriebsbedingungen, die Reifenkräfte und -momente ausreichend genau durch einen abstrakten mathematischen Ansatz beschreiben könnte, wäre dies also für viele Fragestellungen ausreichend.

In der Sprache der Systemdynamik ist dies die genügend genaue Kenntnis des Eingangs-/Ausgangsverhaltens des Systems ‚Reifen‘ in allen relevanten Situationen, Bild 1.



In Bild 1 wird auch angedeutet, dass dieser Zusammenhang nicht eindeutig ist, sondern durch eine Vielzahl von Zustandsgrößen beeinflusst wird. Der Reifen ist innerhalb eines MKS-Modells ein hochdynamisches, extrem nichtlineares Kraftelement.

Das nach wie vor, auch bei MKS-Simulationen, am

häufigsten eingesetzte Reifenmodell ist wohl die ‚Magic Formula‘, entwickelt von Pacejka und anderen. Diese ist mittlerweile in einer unüberschaubaren Vielzahl von offiziellen und ‚hausinternen‘ Varianten zu finden.

Kern der ‚Magic Formula‘ ist eine rein mathematische („phänomenologische“) Beschreibung des stationären Eingangs-/Ausgangsverhaltens, streng genommen gültig nur unter ganz bestimmten Betriebsbedingungen:

- ebene Fahrbahn (oder allenfalls langwellige Unebenheiten),
- konstante Geschwindigkeit der Felge in Längs- und Querrichtung (oder allenfalls kleine Beschleunigungen),
- nur langsame Änderung der Radlast und des Sturzwinkels,
- konstanter Innendruck,
- konstante Fahrbahn-Reibwerte,

usw. Die ‚Magic Formula‘ ist immer eingebettet in einen Algorithmus zur Kontakt- und Vertikalkraft-Berechnung und wird meist durch einzelne lineare oder nichtlineare

‚Verzögerungs-Differenzialgleichungen‘ erster oder zweiter Ordnung ergänzt. Diese Differenzialgleichungen beschreiben in erster Näherung den verzögerten Auf- und Abbau der Reifenkräfte bei schnellen Änderungen der Eingangsgrößen.

Modelle dieser Art erreichen, entsprechend umfangreiche zugrundeliegende Messprogramme vorausgesetzt, durch den Einsatz von ‚Parameter-Fit‘-Software eine außerordentliche Genauigkeit. Dies gilt aber selbstverständlich immer nur unter denjenigen Betriebsbedingungen, für die das Modell entwickelt wurde (vgl. obige Liste), und die durch Messungen gestützt sind. Dabei handelt es sich in erster Linie um quasistationäre Simulationen auf fast ebener Fahrbahn.

Weniger Sinn macht es, solche Reifenmodelle in hochdynamischen Situationen einzusetzen, in denen die komplexen MKS-Fahrwerkmodelle ihre eigentliche Stärke entfalten, wie zum Beispiel:

- Fahrt über Schlechtwegstrecken,
- ABS/ESP-Wirkung auf ebener oder unebener Fahrbahn,
- Lenkungsunruhe und Shimmy-Untersuchungen,
- Parkieren (mit Berücksichtigung von ‚Stick-Slip‘-Vorgängen in der Aufstandsfläche),
- Überrollen von Einzelhindernissen,
- Auswirkungen von Reifenungleichförmigkeiten,
- plötzlicher Druckverlust,

usw. Hier sind Modelle gefragt, die besser zur MKS-Modellierung des Fahrwerks passen:

- **physikalische Modellbildung statt empirische Beschreibung** (um das Reifenverhalten auch in Betriebspunkten vorherzusagen, die nicht durch Messungen gestützt sind),
- Gültigkeit in einem **ähnlichen Frequenzbereich wie das Fahrwerkmodell** (um die Anregungsmechanismen und die Auswirkungen gekoppelter Schwingungen analysieren zu können),
- Gültigkeit auch bei **kurzweiligen Straßenunebenheiten und Einzelhindernissen** (um nicht nur Handling-, sondern auch Komfort- und Lebensdauersimulationen durchführen zu können).

Zur Zeit gibt es nur wenige allgemein verfügbare Reifenmodelle, die in diese Richtung zielen. Das Modell *FTire* des Autors gehört dazu. *FTire* ist ab Version 11.01 in ADAMS™ als lizenzpflichtiges Modul erhältlich, kann aber auch in einer ‚stand-alone‘-Version betrieben oder in eigene Fahrdynamik-Simulationsprogramme eingebunden werden.

3. *FTire*, Entwicklungsziele

FTire (**F**lexible **R**ing **T**ire Model) ist zunächst als nichtlineares Schwingungsmodell konzipiert. Der Stahlgürtel wird durch einen flexiblen Ring repräsentiert, der in sämtliche Richtungen relativ zur Felge verschoben und verdreht werden kann. Außerdem kann er sowohl in der Mittelebene (‚in-plane‘) wie senkrecht dazu (‚out-of-plane‘) gebogen, und eventuell in Umfangsrichtung tordiert werden.

Dieser Ansatz ist ein Kompromiss zwischen echten räumlichen Strukturmodellen wie etwa das Modell *DTire* (**D**ynamic **N**onlinear **S**patial **T**ire Model, vgl. [4]) des Autors, und reinen ‚in-plane‘-Schwingungsmodellen wie zum Beispiel *CTire* (**C**omfort **T**ire Model, vgl. [5]). FE-Modelle wie *DTire* sind sehr rechenzeitintensiv, während reine in-plane-Modelle wie *CTire* naturgemäß einen eingeschränkten Gültigkeitsbereich haben. Sie berechnen nur die Radlast, die Umfangskraft und das Rollwiderstandsmoment, und können nur dann gleichzeitig für Komfort- und Handlingsimulationen eingesetzt werden, wenn sie durch empirische Ansätze wie die Magic Formula für die übrigen Kräfte und Momente (Seitenkraft, Rückstellmoment, Sturzmoment) ergänzt werden. Für *FTire* gelten diese Einschränkungen nicht.

Die konkreten Entwicklungsziele von *FTire* waren zunächst:

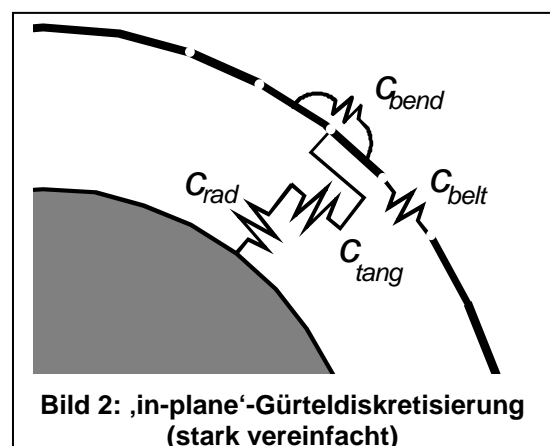
- einfache Implementierung mit mehrfachen Instanzen in MKS-Software,
- nichtlineare Beschreibung im Zeitbereich,
- gültig im Frequenzbereich bis mindestens 120 Hz,
- gültig für Anregungswellenlängen in Rollrichtung von weniger als der halben Länge der Aufstandsfläche,
- Berücksichtigung der Straßenquerneigung, jedoch nicht von extrem kurzwelligen Unebenheiten in Querrichtung (diese Einschränkung wurde inzwischen abgemindert),
- optional Berechnung der Struktursteifigkeiten anhand vorgegebener modaler Eigenschaften des linearisierten Modells,
- sämtliche Reifenkräfte und -momente als Ergebnis einer physikalisch orientierten Modellierung,
- Rechenzeit höchstens 10 .. 20 mal Echtzeit, abhängig von der Plattform,
- hohe Genauigkeit beim langsamen und schnellen Überrollen von hohen und/oder scharfkantigen Einzelhindernissen wie Schlagleisten, Bordsteine, Schlaglöcher, und
- ausreichend genaue Abbildung der Handlingeigenschaften in sämtlichen relevanten, stationären wie schnell veränderlichen Betriebsbedingungen.

Vor allem die Rechenzeitanforderungen führten dazu, dass bei der Entwicklung von *FTire* den numerischen Algorithmen ein ganz besonderer Stellenwert zukam.

4. Modellbildung

Die Modellbildung ist wie folgt:

- wie schon erwähnt, ist der Stahlgürtel als **dehnbarer** und **flexibler Ring** nachgebildet. Dieser Ring, ausgestattet mit verteilten Biegesteifigkeiten, ist in radialer, tangentialer und axialer Richtung durch verteilte Steifigkeiten an die Felge gekoppelt. Alle Steifigkeiten hängen ab vom Innendruck, der außerdem durch die Vorspannung in Umfangsrichtung den Gürtel zusätzlich versteift.

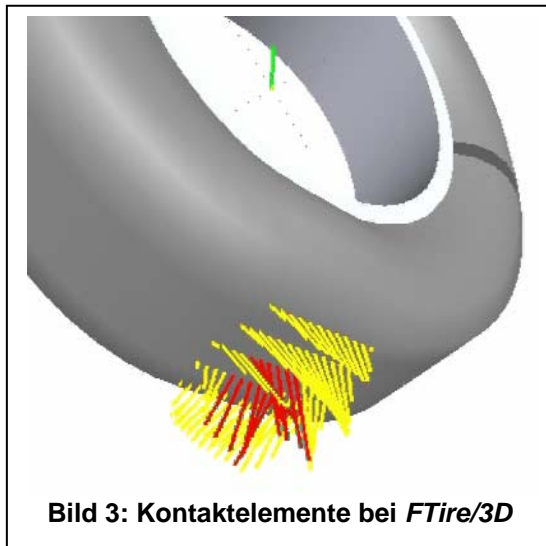


Die Steifigkeit in radialer Richtung ist durch Parallelschaltungen von nichtlinearen Federn mit je einer Feder-Dämpfer-Reihenschaltung dargestellt. Damit ist es möglich, die dynamische Verhärtung des Reifens in radialer Richtung bei größeren Rollgeschwindigkeiten zu beschreiben.

Der Ring wird numerisch approximiert durch eine gewisse Zahl (50 .. 150, je nach Genauigkeitsanforderungen) von Punktmassen. Diese werden **Gürtelelemente** genannt. Sie sind mit den direkt benachbarten Elementen durch (sehr steife) Federn und Dämpfer, sowie durch je eine Biegesteifigkeit in der Gürtel Ebene und senkrecht zu dieser gekoppelt.

In einer zu dieser Standardmodellierung aufwärtskompatiblen Erweiterung (*FTire/3D*) tragen die Gürtel Elemente je einen zusätzlichen Freiheitsgrad: Rotation um die Gürtellängsachse. Dieser Freiheitsgrad ist ebenfalls elastisch an die Felge gekoppelt. Außerdem ergibt sich eine weitere Verkopplung durch Torsionsfedern, die zwischen benachbarten Gürtel Elementen angeordnet sind.

- Die meisten Gürtelsteifigkeiten, Biegesteifigkeiten und Dämpfungsbeiwerte können in der ‚Pre-Processing‘-Phase von *FTire* selbst berechnet werden. Dazu müssen entweder modale oder statische Eigenschaften des Reifens vorgegeben werden: die Eigenfrequenzen gewisser Starrkörper- und Biegemoden, und/oder die Vertikalsteifigkeit auf ebener Aufstandsfläche oder gewissen speziellen Testhindernissen.
- Zu jedem Gürtel Element gehört eine bestimmte Menge (5 .. 40, je nach Genauigkeitsanforderungen) von



Laufstreifen- oder **Kontaktelementen.** Diese sind masselos, und durch nichtlineare Federn und Dämpfer in radialer, tangentialer und axialer Richtung mit dem Gürtel Element und dessen nächstem Nachbarn gekoppelt. Die radiale Einfederung der Laufstreifenelemente hängt ab vom Straßenhöhenprofil, sowie von der Position und Orientierung der beiden zugeordneten Gürtel Elemente. Die tangentiale und radiale Auslenkung ergibt sich aus dem Kräftegleichgewicht aus Scher-

und Reibkräften. Die Reibkräfte sind eine Funktion der Gleitgeschwindigkeit des Stollens in der lokalen Straßen-Tangentialebene, sowie des Anpressdruckes.

In der Standardversion von *FTire* sind die Kontaktelemente längs eines einzelnen Streifens in Laufstreifenmitte angeordnet. In *FTire/3D* überdecken die Kontaktelemente den gesamten Laufstreifen; entweder regellos verstreut, oder angeordnet in einer vom Benutzer vorgegebenen Anzahl von parallelen Streifen.

Durch eine geeignete Polynom-Interpolation der Positionen der Gürtel­elemente wird sichergestellt, dass sich die polygonale Form des diskretisierten Gürtels nicht in einer entsprechend verfälschten Bodendruckverteilung der Kontaktelemente widerspiegelt.

- Die sechs Komponenten der resultierenden Kräfte und Momente, die der Reifen auf die Felgenmitte ausübt, werden schließlich durch Summation aller Kräfte und Momente in der elastischen Gürtelbettung errechnet.

Mit diesen Ansätzen ist das resultierende Reifenmodell noch bis in relativ hohe Frequenzbereiche gültig, sowohl in Längs- wie in Querrichtung. Letzteres gilt bei Anregungen über die Straße vor allem für die *FTire/3D*-Variante. Es gibt nur wenig Einschränkungen, was den Einsatz bei Längs-, Quer- und Vertikaldynamik-Fragestellungen angeht. *FTire* kann problemlos mit hohen und/oder scharfkantigen Einzelhindernissen angeregt werden und arbeitet ohne Modellumschaltung auch im blockierten Zustand oder beim Schleudern und Durchdrehen des Rades. Auch in Extremsituationen, wie in Bild 4 dargestellt, erhöht sich die Rechenzeit nicht.

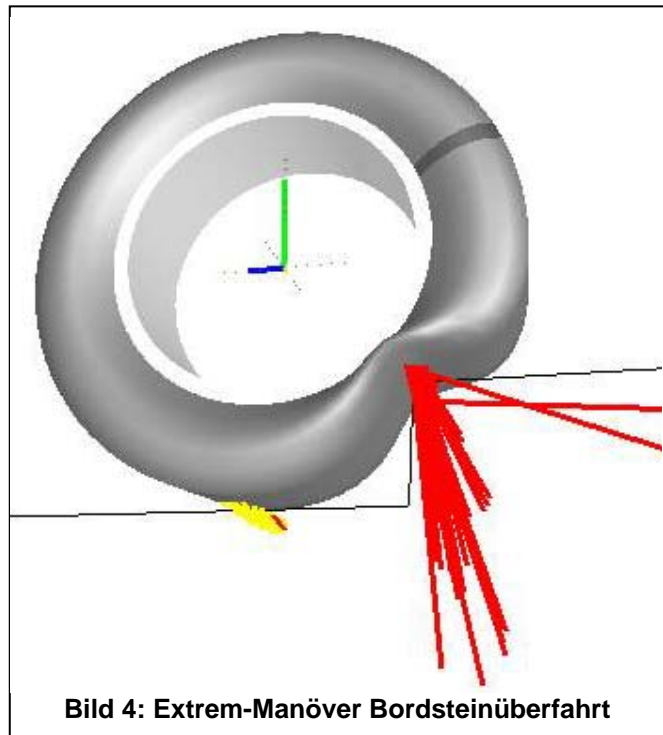


Bild 4: Extrem-Manöver Bordsteinüberfahrt

Kern der *FTire*-Implementierung ist ein impliziter Integrationsalgorithmus zur Berechnung der dynamischen Gürtelform. Durch Verwendung dieses Lösers kann die Gürtel­dehnbarkeit beliebig klein gewählt werden, praktisch bis hin zur völligen Undehnbarkeit. In ADAMS™ arbeitet dieser ‚lokale Subsystem-Integrator‘ sehr gut mit dem zentralen ADAMS™-Integrator zusammen. Dabei wird empfohlen, aus Genauigkeitsgründen mit Ausgabeschritten von höchstens 1..2 ms zu arbeiten, obwohl die numerische Stabilität des Gesamtsystems auch für wesentlich größere Schrittweiten gegeben ist.

5. Programmschnittstellen und Implementierung

Aus Gründen der höchstmöglichen Kompatibilität ist *FTire* in ANSI Fortran 77 kodiert, kann aber selbstverständlich problemlos von Programmen aufgerufen werden, die in anderen Programmiersprachen, wie zum Beispiel C oder C++, geschrieben sind. *FTire* läuft unter allen wichtigen Unix-Betriebssystemen einschließlich Linux, sowie unter allen 32-Bit Windows™-Betriebssystemen.

Zusätzlich zur Implementierung in ADAMS/Tire™ ist eine ‚stand-alone‘-Simulationsumgebung für Windows™ NT, Windows™ 2000 und Unix/Linux verfügbar. Diese Simulationsumgebung ist gedacht zur Unterstützung bei der Parametrierung und Validierung, und zur Vorbereitung von Gesamtfahrzeugsimulationen zum Beispiel mit

ADAMS™. Die vollständige Dokumentation von *FTire* und der Simulationsumgebung kann von www.cosin.de als Teil der Evaluierungsversion heruntergeladen werden.

Es sind zwei verschiedene Programmschnittstellen für *FTire* verfügbar:

- eine **zeitdiskrete Schnittstelle**, die optimal zur Architektur des *FTire*-Lösers passt. Diese Schnittstelle wird in mehreren Fahrdynamik-Simulationsprogrammen verwendet: von ADAMS™, CASCaDE, VEDYNA™ und *COSIN/car*. Die Schnittstelle ist so ausgelegt, dass beliebig viele Instanzen von *FTire* parallel aufgerufen werden können, ohne sich gegenseitig zu stören;
- die zeitkontinuierliche **TYDEX/STI Schnittstelle** Version 1.4, vgl. [10]. Diese Schnittstelle wurde ursprünglich zur vereinheitlichten Ankopplung der unterschiedlichsten Reifenmodelle an kommerzielle MKS-Software konzipiert. Auch diese Schnittstelle erlaubt selbstverständlich Mehrfachinstanzen des Reifenmodells.

Wie erwähnt, wird *FTire* in ADAMS™ über die zeitdiskrete Schnittstelle gerufen. Dies wird jedoch ‚verpackt‘ in einem Aufruf der Routine TYR912, die wie alle Reifenmodelle in ADAMS™ die TYDEX/STI Aufrufsyntax nachbildet. Durch umfangreiche numerische Feinabstimmungen und Tests ist es gelungen, die Verwendung einiger diskreter Zustände in *FTire* auf robuste Art mit den sehr genauen, schrittweitensteuernden Integratoren von ADAMS™ zu kombinieren.

Bei beiden Schnittstellenvarianten geschieht die Kopplung zu dem Fahrzeug- bzw. Achsmodell des rufenden Programms über die **Starrkörper-Zustandsgrößen** der Felge (vgl. Bild 1), nämlich

- die **Position** der Felgenmitte in globalen Koordinaten,
- der **translatorische Geschwindigkeitsvektor** der Felgenmitte in globalen Koordinaten,
- die **Winkellage der Felge**, definiert durch die Transformationsmatrix vom felgenfesten Koordinatensystem in das globale Koordinatensystem, und
- der **Vektor der Winkelgeschwindigkeit der Felge**, dargestellt in globalen Koordinaten.

Dies sind die Eingangsgrößen von *FTire*. Hinzu kommen

- der **aktuelle Inndendruck** und
- die **aktuelle mittlere Profiltiefe**.

Geplant, aber noch nicht implementiert, ist

- die **aktuelle Reifentemperatur**.

Diese wird zukünftig entweder extern vorgegeben werden können, oder aber durch Auswertung der Verlustleistung in der Reifenstruktur und in der Aufstandsfläche direkt berechnet werden. Die Temperatur ihrerseits beeinflusst vor allem das Reibkennfeld der Laufstreifenmischung.

Als Ausgangsgrößen errechnet *FTire* aus den Eingangs- und Zustandsgrößen

- den **Kraftvektor**, der auf die Felge wirkt, dargestellt in globalen Koordinaten, und
- den **Momentenvektor**, bei einem gedachten Kraftangriffspunkt in Felgenmitte, ebenfalls dargestellt in globalen Koordinaten.

Beim Aufruf aus ADAMS™ muss der Benutzer natürlich nicht die genaue Bedeutung dieser Schnittstellengrößen kennen; vielmehr werden sie automatisch zwischen ADAMS/Tire™ und *FTire* ausgetauscht.

Beim Einbau von *FTire* und weiteren Reifenmodellen in andere Simulationsprogramme hat sich auch eine zweite, etwas modifizierte Schnittstelle bewährt. Diese verwendet nicht die Felge, sondern den Radträger als Bezugskörper, und überlässt die Integration der Radeigendrehung dem Reifenmodell. Die Alternative ist in [5] detailliert beschrieben.

Das **Straßen-Höhenprofil** bzw. die **Straßenoberfläche** wird mit einer einfachen und sehr allgemein gehaltenen Schnittstelle an *FTire* übergeben. Es existieren mehrere Implementierungen einer damit kompatiblen Straßenbeschreibung, unter anderem

- die STI-Empfehlung zur Beschreibung von Straßenoberflächen (vgl. [5]),
- die ADAMS™-Straßenbeschreibung („method = 2D“),
- die Straßenbeschreibung von *COSIN/car* und der *FTire*-Simulationsumgebung,
- eine vom Benutzer frei programmierbare Routine, und
- Speziallösungen für kundenspezifische Software.

Es ist nicht nötig, Gradienten oder Krümmungen der Oberfläche zu berechnen, dies wird von *FTire* intern durch numerisches Differenzieren durchgeführt. Lediglich die **Straßenhöhe** z an einem beliebigen Ort muss als Funktion von x und y in globalen Koordinaten berechenbar sein. Das gleiche gilt optional für einen **Reibwert-Anpassungsfaktor** $\mu(x,y)$, der mit dem im *FTire*-Datenfile definierten Reibkennfeld multipliziert wird.

Es ist zusätzlich möglich, auch normale oder tangential Geschwindigkeiten der Straßenoberfläche an *FTire* zu übergeben – wichtig zum Beispiel bei Simulationen von Trommel- und Hydropuls-Prüfständen.

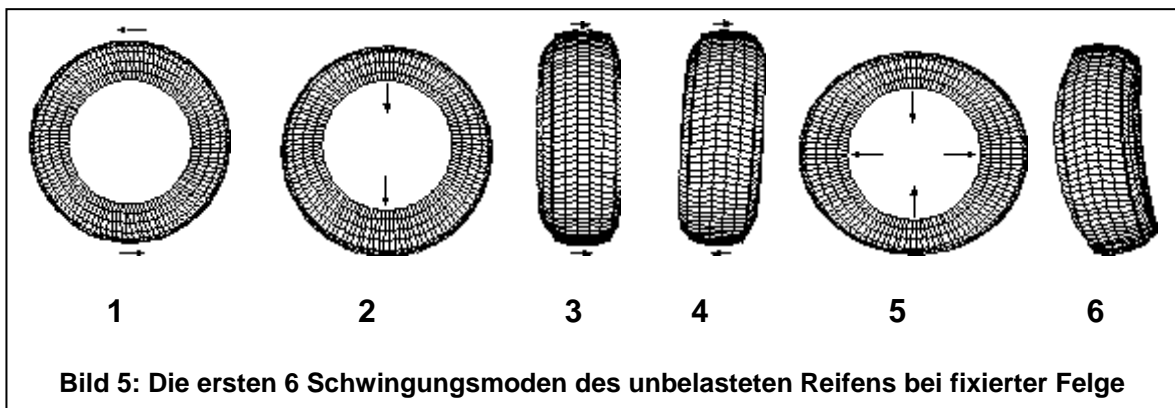
Bei der Simulation mit *FTire* ist keinerlei Vorverarbeitung der Straßendaten erforderlich. Es wurde großer Wert gelegt auf eine ‚objektive‘ Straßenbeschreibung, also eine konsequente Trennung von Reifen- und Straßeneigenschaften.

6. Daten und Datenbeschaffung

Beim Aufruf aus ADAMS™ werden die Modellparameter im ‚TeimOrbit‘-Format eingelesen; *FTire* unterstützt aber auch eine Reihe weiterer Formate, einschließlich des TYDEX-Formates. Hier ist eine vollständige Liste der Daten, die für die Standard-Version von *FTire* verwendet werden:

- **Fülldruck**, bei dem die Daten gemessen wurden (der aktuelle Fülldruck kann während der Simulation ohne erneutes Pre-Processing variiert werden),
- **Abrollumfang** bei normalen Betriebsbedingungen,

- **Felgenhorn-Durchmesser,**
- **Laufstreifenbreite** bei normalen Betriebsbedingungen,
- **Gesamtmasse des Reifens,**
- genau ein Wert aus:
 - **Anteil der Reifenmasse, der den Gürtel­elementen zuzurechnen ist** (Stahlchord, Laufstreifen, etwa die Hälfte der Seitenwände. Nicht dazugehören der restliche Teil der Seitenwände und der Wulst), oder
 - **Reifen-Radialsteifigkeit** bei kleiner Einfederung, auf ebener Unterlage,
- prozentuale **Zunahme der Radialsteifigkeit bei höheren Geschwindigkeiten,** sowie die Rollgeschwindigkeit, bei der die halbe Maximalzunahme erreicht wird,
- prozentuale **Zunahme des Abrollumfangs** bei $v = 200 \text{ km/h}$,
- **Eigenfrequenzen und Dämpfungsmaße des ersten, zweiten und vierten Schwingungsmoden** (vgl. Bild 5) des Reifens mit Füll­druck, ohne Last, bei fixierter (eingespannter) Felge,



- höchstens ein Wert aus:
 - **Eigenfrequenz von Mode 5** (,in-plane'-Biegung), oder
 - **,in-plane'-Biegesteifigkeit** im drucklosen Zustand, oder
 - **Reifen-Radialsteifigkeit** bei kleiner Einfederung auf einer Leiste anstelle des ebenen Untergrundes

(Bemerkung: wird keiner dieser Werte spezifiziert, resultiert die ,in-plane'-Biegesteifigkeit nur aus der Gürtel­vorspannung durch Innendruck. Dies scheint in den meisten Fällen ausreichend genau),
- genau ein Wert aus:
 - **Eigenfrequenz von Mode 6** (,out-of-plane'-Biegung), oder
 - **,out-of-plane'-Biegesteifigkeit** bei Innendruck,
- **Profiltiefe** (kann während der Simulation ohne erneutes Pre-Processing variiert werden),
- **Stärke der Gummischicht über dem Stahlgürtel** bei Profiltiefe 0 mm,
- **Härte der Laufstreifenmischung** in Shore-A,
- **Profilpositiv,**
- Quotient aus **Dämpfungsmodul** und **E-Modul** der Laufstreifenmischung (Bemerkung: es ist noch kein echtes Hysterese­modell für die Materialdämpfung von Elastomeren implementiert. Vereinfachend wird angenommen, dass es sich um viskose Dämpfung handelt),

- **Reibbeiwerte** der Reibpaarung Laufstreifen/Fahrbahnoberfläche, bei verschiedenen Gleitgeschwindigkeiten und Anpressdrücken,
- Kenndaten für verschiedene Reifen-Imperfektionen: Stärke und Winkellage von **statischer** und **dynamischer Unwucht**, Stärke und Winkellage von **radialer** und **tangentialer Non-Uniformity**, sowie **Konizität** und eine **Ply-Steer**-Kenngröße.

Es sind also verschiedene Kombinationen von statischen und modalen Messdaten möglich, die alle für sich eindeutig die verteilten Steifigkeiten und Dämpfungen der *FTire*-Struktur festlegen. Welche Daten tatsächlich verwendet werden, hängt von der Verfügbarkeit bzw. dem Beschaffungsaufwand, und der Genauigkeit der Messungen ab.

Obwohl modale Daten verwendet werden, ist *FTire* **kein** modales Modell. Vielmehr werden diese Daten verwendet, um die verteilten Steifigkeiten und Dämpfungen derart zu bestimmen, dass *FTire* nach einer Linearisierung exakt das gemessene Verhalten im Frequenzbereich aufweist.

Mode 4 und Mode 6 bzw. die ‚out-of-plane‘-Biegesteifigkeit bestimmen zusammen mit dem Reibkennfeld sehr stark die Handling-Eigenschaften, also die Seitenkraft- und Rückstellmomentenkennlinien als Funktion des Schräglaufwinkels. Dies kann ausgenutzt werden, um anhand gemessener Kennlinien die Daten zu validieren.

Zur Zeit wird, zusammen mit einem Reifenhersteller sowie dem Betreiber eines Innentrommelprüfstandes, eine **standardisierte Mess- und Auswerteprozedur** für *FTire*-Daten entwickelt und getestet. Nähere Informationen zu den Ergebnissen werden, sobald sie vorliegen, über die oben erwähnte Internet-Seite veröffentlicht werden.

Eine andere Möglichkeit der *FTire*-Parametrierung ist die **Berechnung** der Daten unter Verwendung von detaillierten FE-Modellen. Dazu wird derzeit ein neues Werkzeug *TIRE/calc* entwickelt. Das dort verwendete parametrisierte FE-Modell auf der Basis von *DTire* ([4], [5]) hat als Eingangsgrößen die wesentlichen Konstruktionsdaten des Reifens und berechnet daraus entweder

- die statischen und modalen Kenngrößen, die anschließend im *FTire*-Pre-Processing weiterverarbeitet werden, oder
- direkt, durch geeignete statische Kondensation, die verteilten Steifigkeiten und Dämpfungen der *FTire*-Struktur.

TIRE/calc ist in einer ersten Testversion lauffähig; die Rechenzeit für eine vollständige Parametrierung liegt unter 3 Minuten auf einem normalen PC. Voraussetzung zur Verwendung dieses Werkzeugs ist natürlich die Kenntnis der Reifen-Konstruktionsdaten. Dabei klingt die Möglichkeit vielversprechend, Parameterstudien direkt an Kenndaten der Reifenkonstruktion durchführen zu können.

7. Rechenzeiten

Die Rechenzeiten von *FTire* hängen natürlich stark ab von der Wahl der Zeitschrittweite, der Anzahl von Gürtel- und Laufstreifenelementen, sowie von der verwendeten

FTire-Variante. Außerdem ist zwischen dem Aufwand für das Pre-Processing und dem für die eigentliche Simulation zu unterscheiden.

Das Pre-Processing muss nur dann durchgeführt werden, wenn sich die Reifendaten geändert haben. In diesem Fall werden die aufbereiteten Daten automatisch gespeichert, die dann beim nächsten Simulationslauf anstelle der Basis-Daten eingelesen werden können.

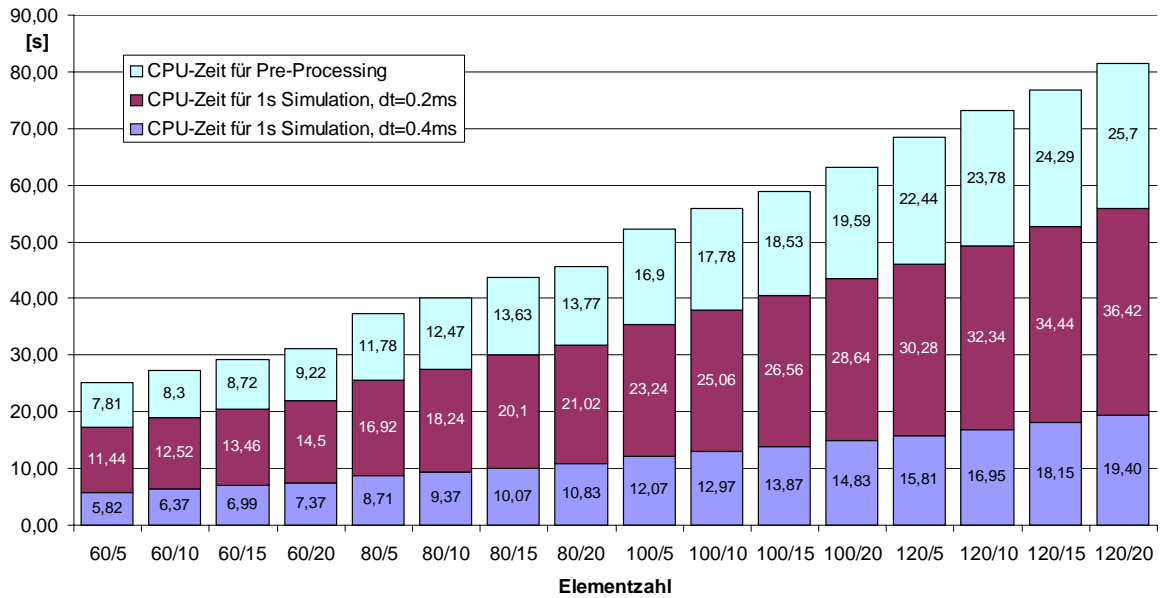


Bild 6: typische Rechenzeiten bei der *FTire* Standard-Version

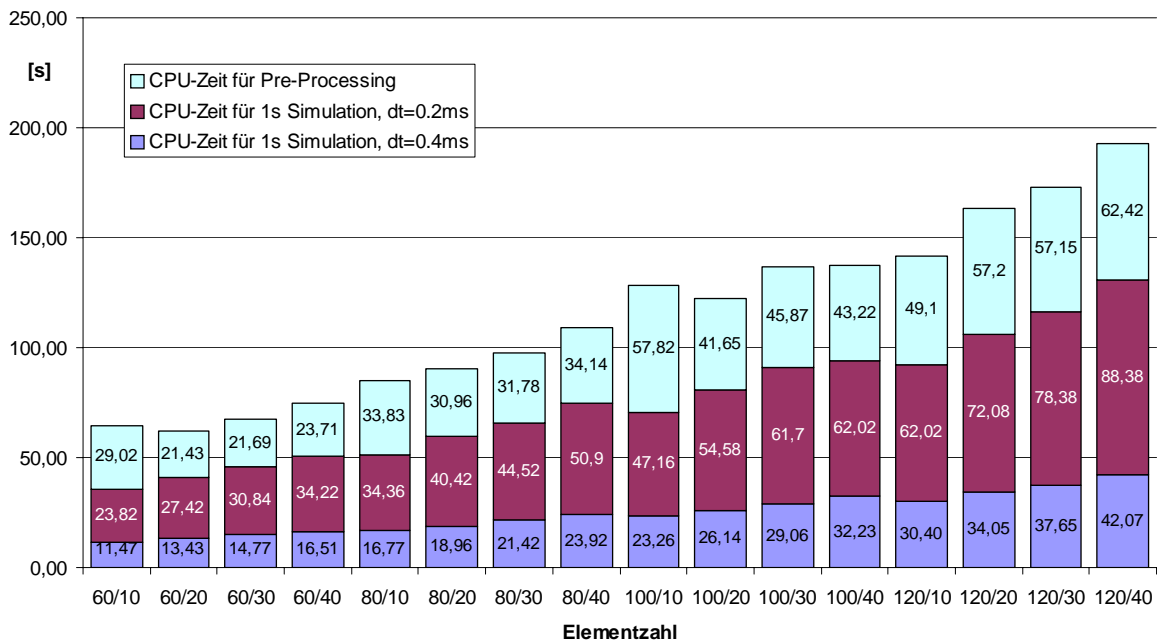


Bild 7: typische Rechenzeiten bei *FTire/3D*

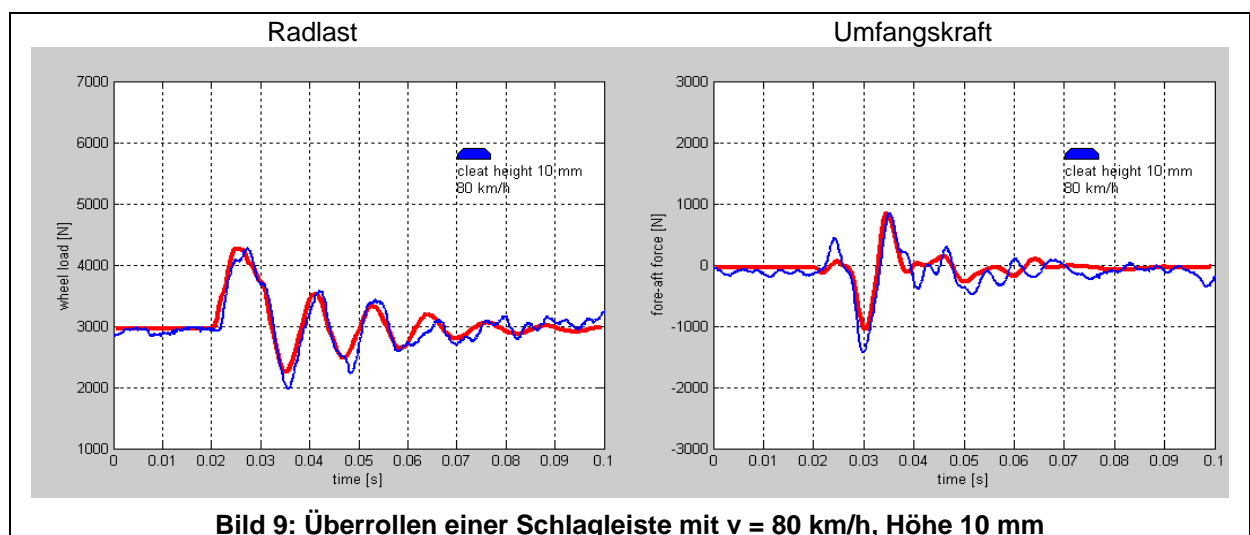
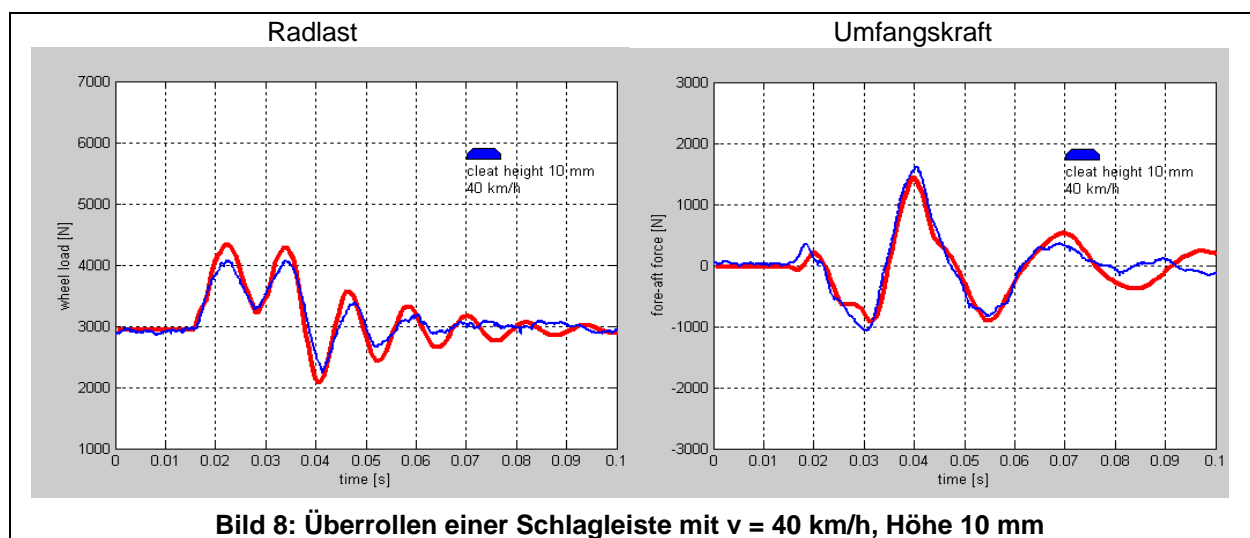
Eine wichtige Eigenschaft von *FTire* ist der höchstens lineare Zusammenhang zwischen Elementzahl und Rechenzeit: eine Verdoppelung von Gürtel- oder Laufstreifenelementen führt auf höchstens die doppelte Rechenzeit. Dies ist den Diagrammen

in Bild 6 und 7 deutlich erkennbar. Die dort angegebenen Rechenzeiten wurden auf einem Pentium™ III 700MHz Notebook unter Windows™ 2000 gemessen.

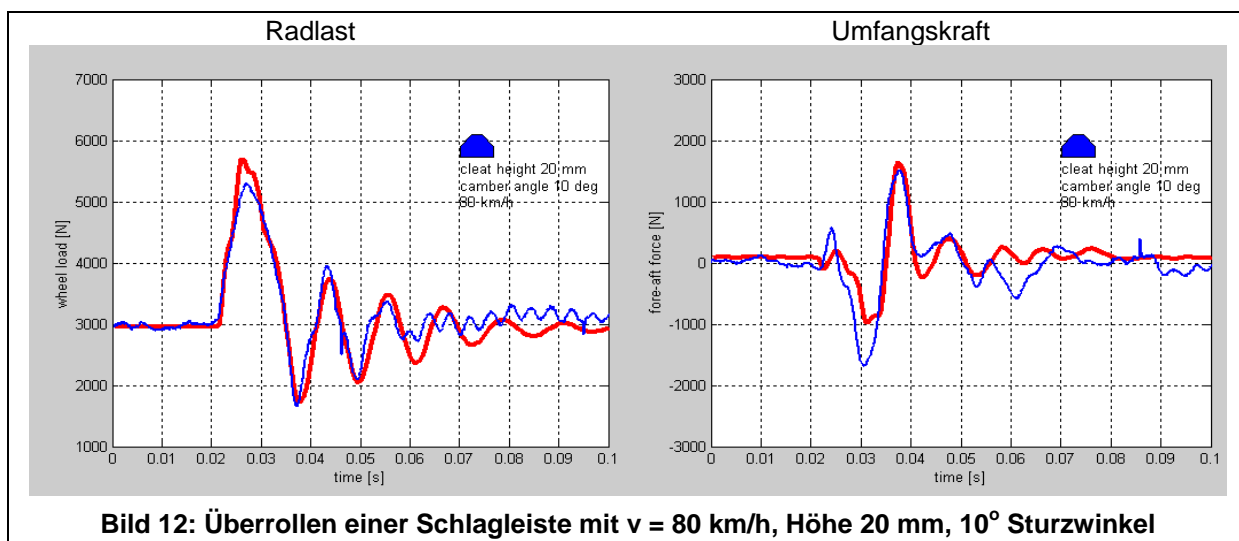
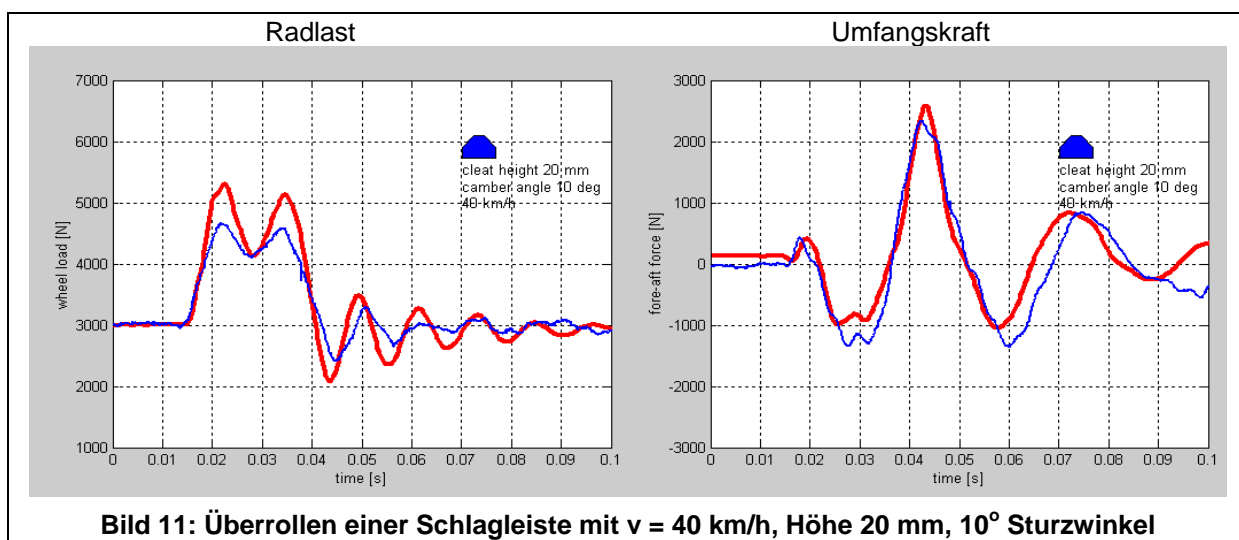
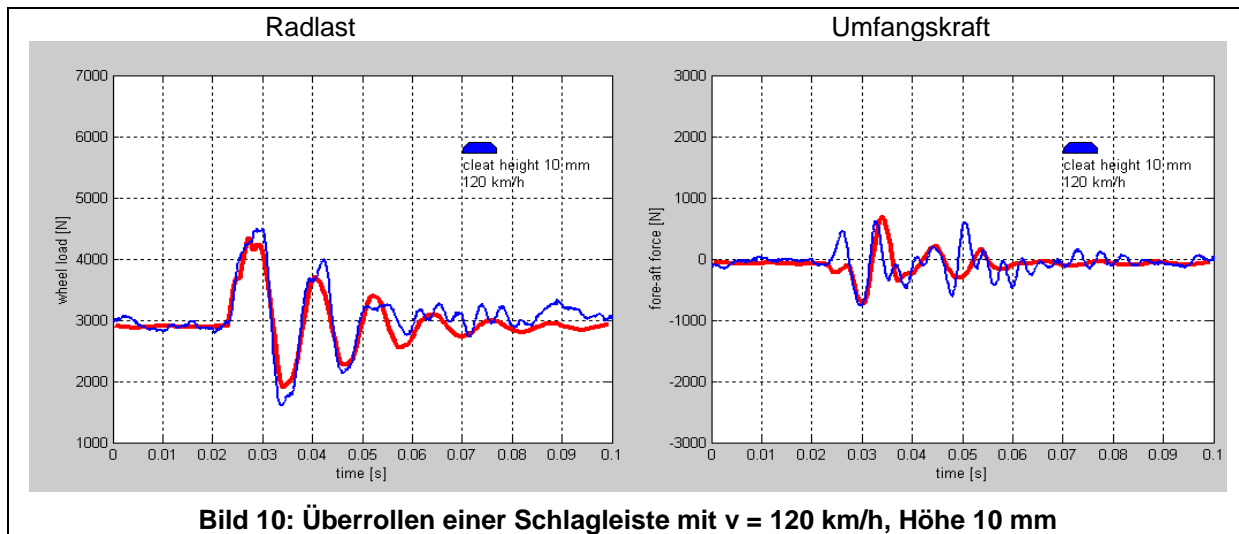
Die Bedeutung der auf der x-Achse aufgetragenen Elementzahl = n/k ist wie folgt: n gibt die Anzahl der Gürtel­elemente an, k die Anzahl der Kontaktelemente je Gürtel­element.

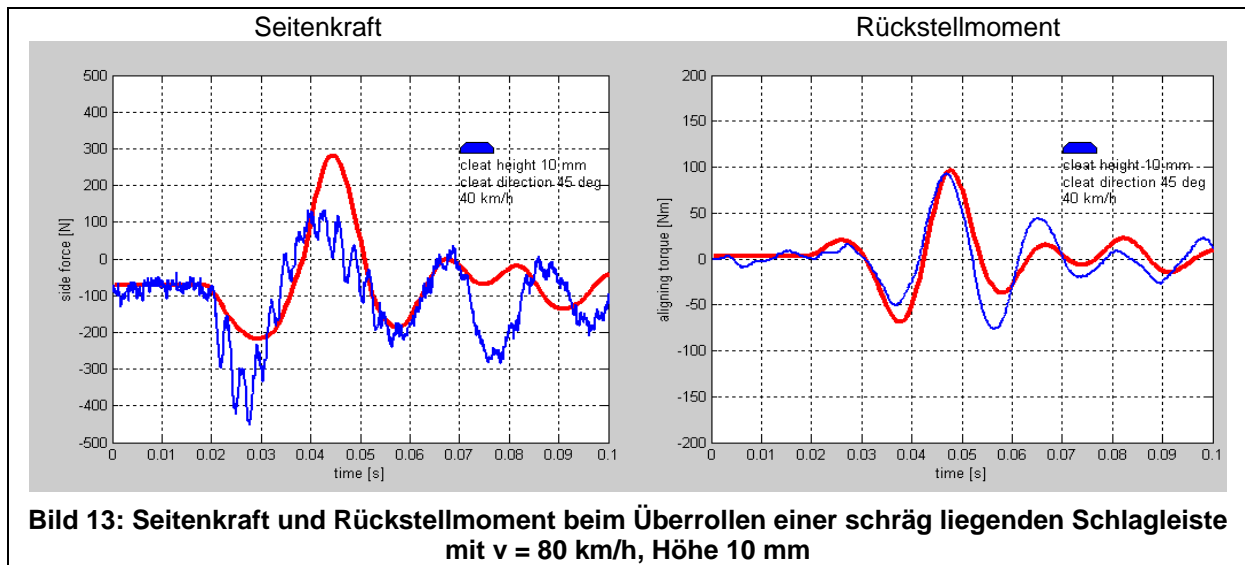
8. Validierungsergebnisse

Die Bilder 8 bis 13 zeigen Validierungsergebnisse für das Überrollen verschieden hoher, teils schräg zur Fahr­richtung liegender **Schlag­leisten**. Die Felgen­höhe wurde dabei festgehalten. Die Geometrie der angefas­ten Schlag­leisten ist in den Diagrammen dargestellt.



Die Messungen in Bild 8 bis 13 (magere, blaue Kurven) wurden am 3,80m-Innentrommelprüfstand der Universität Karlsruhe im Auftrag von DaimlerChrysler Research and Technology durchgeführt. Der Autor dankt DaimlerChrysler Research and Technology für die Bereitstellung.

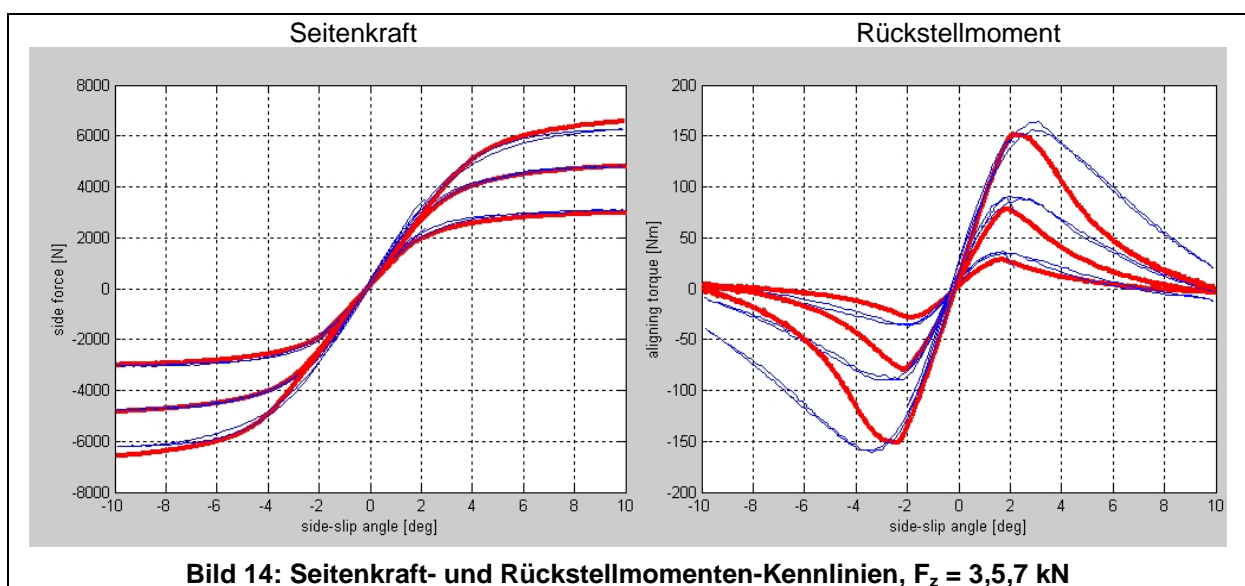




Sämtliche Simulationen (fette, rote Kurven) wurden mit dem gleichen Datensatz mit der 3D-Variante von *FTire* durchgeführt. Es zeigt sich, dass bei kleinen bis mittleren Geschwindigkeiten die Übereinstimmung sowohl im Verlauf der Radlast wie in der Umfangskraft hervorragend ist. Bei großen Geschwindigkeit treten noch gewisse Diskrepanzen in der Umfangskraft auf. Vor allem der erste Peak beim Auftreffen auf die Schlagleiste, der die Felge zunächst kurzfristig nach vorn zieht, ist in *FTire* im Vergleich zur Messung geringer bis überhaupt nicht ausgeprägt.

Bei kleineren Geschwindigkeiten ist dieser interessante Effekt jedoch auch mit *FTire* gut zu beobachten.

Auch die richtige Queranregung beim Überrollen einer schrägliegenden Schlagleiste (Bild 13) ist im Verlauf von Seitenkraft und Rückstellmoment gut zu erkennen. Solche Manöver sind allerdings nur mit der Variante *FTire/3D* sinnvoll.



In Bild 14 ist ein Vergleich gemessener und gerechneter **Seitenkraft-** und **Rückstellmomenten-Kennlinien** dargestellt. Auch hier wurde wieder der gleiche *FTire*-Datensatz wie bei den Schlagleistenüberfahrten verwendet und dabei keinerlei Anpassungen vorgenommen. Die Übereinstimmung der Seitenkraft ist hervorragend. Anfangssteigung, Maximum und Nulldurchgang beim Rückstellmoment ist sehr gut bis gut, die absoluten Werte bei großen Schräglaufwinkeln jedoch noch zu klein.

Bei der Bewertung dieser Validierung ist zu beachten, dass die zugrundegelegten Messungen auf einem Flachbahnprüfstand durchgeführt wurden, dessen Reibwerte und mögliche Nachgiebigkeiten in der Stahlbandführung leider nicht bekannt sind.

9. Geplante Erweiterungen

Der wichtigste Schwerpunkt der kommenden Aktivitäten wird bei der Unterstützung der kostengünstigen und zuverlässigen Parametrierung liegen – wie erwähnt,

- durch Erprobung und Weiterentwicklung einer bereits definierten **Standard-Messprozedur** und Entwicklung der zugehörigen **Auswerte-Software**, sowie
- durch Fertigstellung und Validierung von **TIRE/calc** zur Berechnung wichtiger *FTire*-Daten.

Außerdem ist eine kompatible **stationäre Variante** von *FTire* in der Entwicklung, mit der Federkennlinien und Reifenkennfelder wesentlich schneller als durch Simulation mit der dynamischen *FTire*-Variante berechnet werden können. Mit dieser stationären Variante wird es zum Beispiel möglich sein, die für das Handling-Verhalten maßgeblichen Parameter (wie etwa die out-of-plane-Biegesteifigkeit und das Reibkennfeld) statt durch Messung oder Berechnung

- durch **Parameter-Identifikation**

zu bestimmen – ein dritter Weg der Parametrierung.

Wie bereits erwähnt, wird ein weiterer Schwerpunkt Verfeinerungen des Modells betreffen, zum Beispiel

- die **Temperaturberechnung** aus der Verlustleistung,
- die **Temperaturabhängigkeit** der Parameter, und
- **Kontaktelemente in der Seitenwand.**

Schließlich ist die Einbettung in eine Simulink™-S-Function in Arbeit. Damit wird *FTire* auch als Simulink™-Block verfügbar sein.

Literatur

- [1] **Ammon, D., Gipser, M., Rauh, J., Wimmer, J.:** Effiziente Simulation der Gesamtsystemdynamik Reifen-Achse-Fahrwerk. In: Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn. VDI-Berichte 1224. VDI Verlag 1995
- [2] **Gipser, M.:** DNS-Tire, ein dynamisches, räumliches nichtlineares Reifenmodell. In: Reifen, Fahrwerk, Fahrbahn. VDI Berichte 650, p. 115-135. VDI Verlag, Düsseldorf 1987
- [3] **Gipser, M.:** Zur Modellierung des Reifens in CASCaDE. Mitteilungen des Curt-Risch-Instituts der Universität Hannover. Hannover 1990
- [4] **Gipser, M.:** DNS-Tire 3.0 - die Weiterentwicklung eines bewährten strukturellen Reifenmodells. In: Darmstädter Reifenkolloquium, VDI-Berichte 512, p. 52-62. VDI Verlag Düsseldorf 1996
- [5] **Gipser, M.:** Reifenmodelle für Komfort- und Schlechtwegsimulationen. In: Tagungsband zum 7. Aachener Kolloquium Fahrzeug- und Motorentechnik. IKA, RWTH Aachen und VDI 1998
- [6] **Gipser, M.:** *FTire*, a New Fast Tire Model for Ride Comfort Simulations. International ADAMS User's Conference Berlin 1999
- [7] **Gipser, M.:** *ADAMS/FTire* - A Tire Model for Ride & Durability Simulations. ADAMS User's Conference Tokyo 2000
- [8] **Gipser, M.:** *FTire*, ein Reifenmodell für Handling-, Komfort- und Lebensdauer-simulation. Seminar Fahrwerktechnik, Haus der Technik Osnabrück 2001
- [9] **Gipser, M., Hofer, R., Lugner, P.:** Dynamical Tire Forces Response to Road Unevennesses. In: Tyre Models for Vehicle Dynamic Analysis. Supplement to Vehicle System Dynamics, Vol. 27. Swets&Zeitlinger Lisse 1997
- [10] **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

Weiteres Material zu *FTire*, einschließlich einer Evaluierungsversion, finden Sie unter www.cosin.de .