Wissenschaftliche Reihe
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

RESEARCH

Andreas Wiesebrock

# Ein universelles Fahrbahnmodell für die Fahrdynamiksimulation

IVK

Springer Vieweg

# Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

**Herausgegeben von**
M. Bargende, Stuttgart, Deutschland
H.-C. Reuss, Stuttgart, Deutschland
J. Wiedemann, Stuttgart, Deutschland

Das Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) an der Universität Stuttgart erforscht, entwickelt, appliziert und erprobt, in enger Zusammenarbeit mit der Industrie, Elemente bzw. Technologien aus dem Bereich moderner Fahrzeugkonzepte. Das Institut gliedert sich in die drei Bereiche Kraftfahrwesen, Fahrzeugantriebe und Kraftfahrzeug-Mechatronik. Aufgabe dieser Bereiche ist die Ausarbeitung des Themengebietes im Prüfstandsbetrieb, in Theorie und Simulation.
Schwerpunkte des Kraftfahrwesens sind hierbei die Aerodynamik, Akustik (NVH), Fahrdynamik und Fahrermodellierung, Leichtbau, Sicherheit, Kraftübertragung sowie Energie und Thermomanagement – auch in Verbindung mit hybriden und batterieelektrischen Fahrzeugkonzepten.
Der Bereich Fahrzeugantriebe widmet sich den Themen Brennverfahrensentwicklung einschließlich Regelungs- und Steuerungskonzeptionen bei zugleich minimierten Emissionen, komplexe Abgasnachbehandlung, Aufladesysteme und -strategien, Hybridsysteme und Betriebsstrategien sowie mechanisch-akustischen Fragestellungen.
Themen der Kraftfahrzeug-Mechatronik sind die Antriebsstrangregelung/Hybride, Elektromobilität, Bordnetz und Energiemanagement, Funktions- und Softwareentwicklung sowie Test und Diagnose.
Die Erfüllung dieser Aufgaben wird prüfstandsseitig neben vielem anderen unterstützt durch 19 Motorenprüfstände, zwei Rollenprüfstände, einen 1:1-Fahrsimulator, einen Antriebsstrangprüfstand, einen Thermowindkanal sowie einen 1:1-Aeroakustikwindkanal.
Die wissenschaftliche Reihe „Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart“ präsentiert über die am Institut entstandenen Promotionen die hervorragenden Arbeitsergebnisse der Forschungstätigkeiten am IVK.

**Herausgegeben von**

Prof. Dr.-Ing. Michael Bargende
Lehrstuhl Fahrzeugantriebe,
Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann
Lehrstuhl Kraftfahrwesen,
Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Prof. Dr.-Ing. Hans-Christian Reuss
Lehrstuhl Kraftfahrzeugmechatronik,
Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart
Stuttgart, Deutschland

Andreas Wiesebrock

# Ein universelles Fahrbahnmodell für die Fahrdynamiksimulation

Springer Vieweg

Andreas Wiesebrock
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2016

D93

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart
ISBN 978-3-658-15612-1 ISBN 978-3-658-15613-8 (eBook)
DOI 10.1007/978-3-658-15613-8

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Springer Vieweg
© Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2016
Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die nicht ausdrücklich vom Urheberrechtsgesetz zugelassen ist, bedarf der vorherigen Zustimmung des Verlags. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Bearbeitungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.
Die Wiedergabe von Gebrauchsnamen, Handelsnamen, Warenbezeichnungen usw. in diesem Werk berechtigt auch ohne besondere Kennzeichnung nicht zu der Annahme, dass solche Namen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und daher von jedermann benutzt werden dürften.
Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist Teil von Springer Nature
Die eingetragene Gesellschaft ist Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH
Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

# Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart. Mein besonderer Dank gilt Professor Dr.-Ing. Jochen Wiedemann, Ordinarius für Kraftfahrwesen am Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen (IVK) der Universität Stuttgart und Vorstand am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS). Er hat die vorliegende Arbeit ermöglicht, betreut und mit wertvollen Hinweisen bereichert. Professor Dr.-Ing. Dr. h. c. Wolfram Ressel, Leiter des Instituts für Straßen- und Verkehrswesen (ISV) und Rektor der Universität Stuttgart, danke ich für die Durchsicht des Manuskripts und die Übernahme des Mitberichts. Bei der Umsetzung meines Promotionsvorhabens unterstützten mich viele Kolleginnen und Kollegen am IVK und FKFS. Diesen danke ich für ihre vielfältigen Anregungen. Stellvertretend nennen möchte ich an dieser Stelle Dipl.-Math. Jens Neubeck, Leiter des Bereichs Fahrzeugtechnik und Fahrdynamik am FKFS, der mich bei der inhaltlichen Ausrichtung und Abgrenzung der Arbeit konstruktiv begleitete sowie mir den notwendigen Rückhalt und Freiraum zum selbstständigen und wissenschaftlichen Arbeiten bot. Danken möchte ich ebenso Dr.-Ing. Werner Krantz, der durch seine eigenen Forschungsthemen mit neuen Herausforderungen, Anreizen und Ideen zur Entstehung des universellen Fahrbahnmodells beigetragen hat. Mein Dank gilt ferner den Kolleginnen und Kollegen des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), der Lehmann + Partner GmbH sowie den vielen Studien- und Diplomarbeitern, die an der Entstehung dieser Arbeit mitgewirkt haben. Meiner Frau Judith gilt an dieser Stelle ein ganz besonderer Dank für ihr entgegengebrachtes Verständnis, wenn Gedanken an diese Arbeit unsere gemeinsame Zeit bestimmten.

Andreas Wiesebrock

# Inhaltsverzeichnis

**Vorwort** ..... **V**

**Formelzeichen und Abkürzungen** ..... **IX**

**Zusammenfassung** ..... **XIII**

**Summary** ..... **XVII**

**1 Einleitung** ..... **1**

1.1 Motivation ..... 1

1.2 Stand der Forschung ..... 2

**2 Grundlagen** ..... **9**

2.1 Koordinatensysteme, Notation ..... 9

2.2 Reifenmodelle ..... 12

2.3 Fahrermodelle ..... 19

**3 Fahrbahnmodellierung** ..... **23**

3.1 Mathematische Beschreibung der Fahrbahngeometrie ..... 23

3.1.1 Besonderheiten bei der Fahrbahnmodellierung ..... 33

3.1.2 Berechnung eines NURBS- Fahrbahnpunktes und Bestimmung der Richtungsableitungen ..... 35

3.2 Kontaktpunktbestimmung ..... 37

3.2.1 Gradientenbasiertes Optimierungsverfahren ..... 42

3.2.2 Echtzeitfähige Kontaktpunktapproximation ..... 45

3.2.3 Variation der Torus-Reifengeometrie ..... 47

3.3 Reifenzustandsermittlung ..... 49
3.4 Fahrer-Fahrbahn-Interaktion ..... 55
3.5 Berührungslose Messtechnik ..... 58

**4 Fahrbahnparametrisierung ..... 61**

4.1 Synthetische Fahrbahngenerierung ..... 61
4.1.1 Lageplan ..... 61
4.1.2 Höhenplan ..... 67
4.1.3 Trommel- und Flachbandprüfstand ..... 70
4.1.4 Stochastische Fahrbahnunebenheiten ..... 73
4.2 Versuchstechnische Fahrbahngenerierung ..... 78

**5 Implementierung ..... 83**

**6 Anwendung ..... 87**

6.1 Fahrdynamikregelsystem für ein radindividuell angetriebenes Elektrofahrzeug ..... 87
6.2 Sensitivitätsanalyse rollwiderstandsrelevanter Einflussgrößen bei Nutzfahrzeugen ..... 96
6.3 Bewegte Fahrbahnen ..... 101
6.3.1 Trommelprüfstand ..... 101
6.3.2 Flachbandprüfstand ..... 102
6.3.3 Schleuderplatte ..... 106

**7 Schlussfolgerungen und Ausblick ..... 109**

**Literaturverzeichnis ..... 111**

**Anhang ..... 115**

# Formelzeichen und Abkürzungen

| Abk. | Einheit | Bemerkung |
|---|---|---|
| $a$ | $-$ | Parameter der Kohärenzfunktion |
| $A$ | $-$ | Punkt auf der Fahrbahnoberfläche |
| $A$: | $-$ | Definition einer Fläche |
| $\alpha$ | $rad$ | Schräglaufwinkel |
| $\alpha$ | $rad$ | Fahrbahnlängsneigung |
| $\boldsymbol{A}_{ij}$ | $-$ | Transformationsmatrix der Koordinatensysteme von Punkt $i$ zu Punkt $j$ |
| $\boldsymbol{a}_{ij,k}$ | $m/s^2$ | Beschleunigungsvektor von Punkt $i$ zu Punkt $j$, im Koordinatensystem von Punkt $k$<br>Sind $i$ oder $k$ nicht angegeben, so gilt der Bezug zum Fahrbahnkoordinatensystem $F$ |
| $a^l_{ij,k}$ | $m$ | Koordinate $l$ des Beschleunigungsvektors $\boldsymbol{a}_{ij,k}$ |
| $B$ | $m$ | Breite |
| $B$ | $-$ | Referenzpunkt der berührungslosen Messtechnik |
| BO | | BO-Kraftkreis: Fahrmanöver zur Gewährleistung der Manövrierbarkeit von Nutzfahrzeugen nach der Betriebsordnung für Kraftfahrunternehmen im Personalverkehr |
| $\beta$ | $rad$ | Schwimmwinkel |
| $\beta$ | $rad$ | Fahrbahnquerneigung |
| $C$ | $-$ | Tydex-C-System |
| $c_N$ | $N/m$ | Vertikale Reifensteifigkeit |
| CRG | | Curved Regular Grid |
| $D$ | $m$ | Durchmesser |
| $D_F$ | $m$ | Felgendurchmesser |
| $\Delta y$ | $m$ | Querversatz zweier Längsprofile |
| $\delta$ | $rad$ | Lenkwinkel |
| $d_N$ | $Ns/m$ | Vertikale Reifendämpfung |
| $e$ | $m$ | Virtuelle Eindringung des unverformten Reifenkörpers in die Fahrbahn |
| $f$ | $s^{-1}$ | Frequenz |
| $f()$ | $-$ | Funktion |

| Abk. | Einheit | Bemerkung |
|---|---|---|
| $F$ | $-$ | Fahrbahnursprung |
| $F$ | $N$ | Kraft |
| $F_N$ | $N$ | Normalkraft |
| $F_S$ | $N$ | Seitenkraft |
| $F_U$ | $N$ | Umfangskraft |
| FIR | | Finite Impulse Response |
| FKFS | | Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart |
| $\Phi_h$ | $m^3$ | Spektrale Unebenheitsdichte |
| $\gamma$ | $rad$ | Sturzwinkel |
| $\gamma_h$ | $-$ | Kohärenzfunktion |
| $H$ | $m$ | Höhe |
| $H$ | $-$ | Tydex-H-System |
| HiL | | Hardware in the Loop |
| $i$ | $-$ | Position im Knotenvektor $\boldsymbol{U}$ |
| $I$ | $-$ | Inertial-Koordinatensystem |
| IVK | | Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen, Universität Stuttgart |
| $j$ | $-$ | Position im Knotenvektor $\boldsymbol{V}$ |
| $\varphi$ | $rad$ | Roll-/Wankwinkel |
| $J_z$ | $\frac{Nms^2}{rad}$ | Trägheitsmoment und die $z$-Achse |
| $k$ | $-$ | Höhenbreitenverhältnis eines Fahrzeugreifens |
| $k$: | $-$ | Definition einer Kurve |
| $K$ | $-$ | Kontaktpunkt zwischen Reifen und Fahrbahn |
| $\kappa$ | $m^{-1}$ | Fahrbahnkrümmung |
| $k_D$ | $-$ | Regelparameter Differentialanteil |
| $k_h$ | $N/rad$ | Schräglaufsteifigkeit der Hinterachse des Einspurmodells |
| $k_P$ | $-$ | Regelparameter Proportionalanteil |
| $k_v$ | $N/rad$ | Schräglaufsteifigkeit der Vorderachse des Einspurmodells |
| $\boldsymbol{l}$ | $-$ | Richtungsvektor |
| $l$ | $m$ | Länge entlang des Richtungsvektors $\boldsymbol{l}$ |
| $L$ | $m$ | Länge |

| Abk. | Einheit | Bemerkung |
|---|---|---|
| $L$ | $-$ | Laserpunkt auf der Fahrbahnoberfläche |
| $\lambda$ | $-$ | Längsschlupf |
| $l_h$ | $m$ | Abstand der Hinterachse zum Fahrzeugschwerpunkt in Fahrzeuglängsrichtung |
| $l_v$ | $m$ | Abstand der Vorderachse zum Fahrzeugschwerpunkt in Fahrzeuglängsrichtung |
| $m$ | $-$ | Anzahl der Stützstellen $-1$ quer zur Fahrtrichtung |
| $m$ | $kg$ | Masse |
| $M$ | $N$ | Moment |
| $M$ | $-$ | Punkt auf der Fahrbahnmittellinie |
| $\mu$ | $-$ | Kraftschlussausnutzung |
| $\hat{\mu}$ | $-$ | Maximaler Kraftschluss |
| MKS | | Mehrkörpersimulation |
| $n$ | $-$ | Anzahl der Stützstellen $-1$ entlang der Fahrtrichtung |
| $\boldsymbol{n}$ | $-$ | Normalenvektor |
| $N$ | $-$ | Basisfunktion der NURBS-Approximation |
| NURBS | | Nicht uniforme rationale B-Splines |
| NVH | | Noise Vibration Harshness |
| $p$ | $-$ | Ordnung der Approximation entlang der Fahrtrichtung |
| $p$ | $-$ | Parameter der Kohärenzfunktion |
| $\boldsymbol{P}$ | | Stützstellenmatrix, Einheit ist von der Anwendung abhängig |
| $\boldsymbol{q}$ | $-$ | Richtungsvektor |
| $q$ | $m$ | Länge entlang des Richtungsvektors $\boldsymbol{q}$ |
| $q$ | $-$ | Ordnung der Approximation quer zur Fahrtrichtung |
| $\theta$ | $rad$ | Nickwinkel |
| $R$ | $m$ | Radius |
| $R$ | $-$ | Reifenmittelpunkt |
| $r_0$ | $m$ | Radius des unverformten Reifens |
| $r_{dyn}$ | $m$ | Dynamischer Radhalbmesser |
| $\boldsymbol{r}_{ij,k}$ | $m$ | Ortsvektor von Punkt $i$ zu Punkt $j$, im Koordinatensystem von Punkt $k$<br>Sind $i$ oder $k$ nicht angegeben, so gilt der Bezug zum Fahrbahnkoordinatensystem $F$ |
| $r_{ij,k}^{l}$ | $m$ | Koordinate $l$ des Ortsvektors $\boldsymbol{r}_{ij,k}$ |

| Abk. | Einheit | Bemerkung |
|---|---|---|
| RGR | | Regular Grid Road |
| $s$ | $m$ | Weg entlang der Fahrbahnmittellinie |
| $S$ | $-$ | Schlupfpunkt |
| $\sigma$ | $N/m^2$ | Spannung |
| SiL | | Software in the Loop |
| $t$ | $s$ | Zeit |
| $T$ | $s$ | Zeitkonstante |
| $u$ | $-$ | Flächenparameter entlang der Fahrtrichtung |
| $\boldsymbol{U}$ | $-$ | Knotenvektor entlang der Fahrtrichtung |
| $v$ | $-$ | Flächenparameter quer zur Fahrtrichtung |
| $\boldsymbol{V}$ | $-$ | Knotenvektor quer zur Fahrtrichtung |
| $V$ | $-$ | Vorschaupunkt des Fahrermodells |
| $\boldsymbol{v}_{ij,k}$ | $m/s$ | Geschwindigkeitsvektor von Punkt $i$ zu Punkt $j$, im Koordinatensystem von Punkt $k$<br>Sind $i$ oder $k$ nicht angegeben, so gilt der Bezug zum Fahrbahnkoordinatensystem $F$ |
| $v_{ij,k}^{l}$ | $m$ | Koordinate $l$ des Geschwindigkeitsvektors $\boldsymbol{v}_{ij,k}$ |
| $\boldsymbol{w}$ | $-$ | Gewichtungsmatrix |
| $w$ | $-$ | Welligkeit |
| $W$ | $-$ | Tydex-W-System |
| $\Omega$ | $m^{-1}$ | Kreisfrequenz |
| $\boldsymbol{\omega}_{ij,k}$ | $rad/s$ | Drehgeschwindigkeitsvektor von Punkt i zu Punkt j, im Koordinatensystem von Punkt k<br>Sind $i$ oder $k$ nicht angegeben, so gilt der Bezug zum Fahrbahnkoordinatensystem $F$ |
| $\omega_{ij,k}^{l}$ | $m$ | Koordinate $l$ des Drehgeschwindigkeitsvektors $\boldsymbol{\omega}_{ij,k}$ |
| $x$ | $m$ | 1. Koordinate eines kartesischen Koordinatensystems |
| $y$ | $m$ | 2. Koordinate eines kartesischen Koordinatensystems |
| $\psi$ | $rad$ | Gierwinkel |
| $z$ | $m$ | 3. Koordinate eines kartesischen Koordinatensystems |

# Zusammenfassung

Die Fahrdynamiksimulation ist heute wesentlicher Bestandteil der Fahrzeugentwicklung. Beim Einsatz von Mehrkörpersimulationsmodellen werden die Fahrzeugteilsysteme und -komponenten durch Starrkörper abgebildet, die mit verschiedenen Gelenktypen gekoppelt sind. Masselose Kraftelemente ergänzen die Simulationsumgebung und bilden beispielsweise den Luftwiderstand, das Feder- und Dämpfersystem des Fahrwerks oder die Reifenkräfte ab. Eine der größten Herausforderungen der Fahrdynamiksimulation stellt die Modellierung der Reifen-Fahrbahn-Interaktion dar, da einerseits die Qualität des Reifenmodells maßgeblich für die Qualität des Gesamtmodells verantwortlich ist. Andererseits sind die Mechanismen zur Kraftentstehung im Reifenlatsch von vielen Einflussfaktoren abhängig, die nur begrenzt in einem Reifenmodell abgebildet werden können. Neben dem Reifen selbst hat ebenso die Fahrbahnoberfläche einen Einfluss auf die entstehenden Reifenkräfte und das resultierende Fahrverhalten.

Diese Arbeit zeigt wesentliche Erweiterungsansätze bei der Modellierung der Fahrbahn für verschiedene fahrdynamische Anwendungsfälle und entwickelt hieraus ein universelles Fahrbahnmodell. Während in bisherigen Fahrbahnmodellen abhängig von der jeweiligen Anwendung des Reifenkraftmodells unterschiedliche mathematische Beschreibungsformen der Fahrbahnoberfläche herangezogen werden mussten, kann das universelle Fahrbahnmodell durch den Einsatz einer verallgemeinerten Interpolationsmethodik nahezu jede beliebige Fahrbahnoberfläche ohne ungewollte Knickstellen sowie mit geringem Rechenaufwand und Speicherbedarf darstellen. Die Verallgemeinerung der mathematischen Beschreibung der Fahrbahnoberfläche stellt im gleichem Zuge auch die Wiederverwendbarkeit aktueller Fahrbahnmodelle sicher.

Der Einsatz unterschiedlicher Reifenkraftmodelle wird durch eine definierte Schnittstelle zwischen Fahrbahn- und Reifenmodell ermöglicht. Je nach Einsatzzweck und Entwicklungsstand kann auf diese Weise ein passendes Reifenkraftmodell verwendet werden, ohne dass die Auswahl der Fahrbahn eingeschränkt wird. Zur Bestimmung des Reifenzustands setzt das universelle Fahrbahnmodell eine gradientenbasierte Optimierungsmethode ein, die

ebenfalls auf ein Interaktionsmodell der Fahrbahn mit einem simulierten Fahrer sowie ein weiteres Modell zur Simulation von optischen Messsystemen übertragen wurde. In der Bestimmung der Reifenzustandsgrößen konnten weitere Fortschritte erzielt werden, indem der Fahrzeugreifen als Toruskörper modelliert wurde. Im Vergleich zu heute üblichen Verfahren, bei denen der Reifen lediglich als ebene Scheibe dargestellt wird, steigert dies insbesondere bei großen Sturzwinkeln die Qualität des Simulationsergebnisses.

Zur Simulation von Prüfständen mit bewegten Fahrbahnen, wie z.B. einem Trommel- oder Flachbandprüfstand, wurde bei der Erstellung des Fahrbahnmodells darauf geachtet, sämtliche Rechenschritte in Relativkoordinaten zum Fahrbahnkoordinatensystem auszudrücken. Durch diese Vorgehensweise wird die Betrachtung der Reaktionskräfte im Reifenlatsch auf eine Prüfstandsumgebung ermöglicht.

Die Anwenderfreundlichkeit des universellen Fahrbahnmodells ist durch eine eigens entwickelte Benutzeroberfläche sowie eine MATLAB-Funktionsbibliothek sichergestellt. Der Benutzer wird hierbei bei der Erstellung, Darstellung und Bearbeitung synthetischer Straßenprofile sowie beim Import von messtechnisch erfassten Straßenprofilen unterstützt. Das universelle Fahrbahnmodell wurde in der Mehrkörpersimulationsumgebung Simpack mit verschiedenen Reifenmodellen als Kraftelement implementiert. Weitere Sensormodelle für Fahrer und Messtechnik bieten dem Benutzer alle erforderlichen Werkzeuge zur Simulation komplexer Aufgabenstellungen.

Die Vorteile des universellen Fahrbahnmodells werden in mehreren Anwendungsfällen aufgezeigt. So konnten die Anforderungen an einen geplanten Fahrdynamikprüfstand durch eine Mehrkörpersimulation abgeleitet werden. Der Fahrdynamikprüfstand besteht aus vier Laufbandeinheiten, die durch jeweils eine Hub- und Giereinrichtung in zwei Freiheitsgraden bewegt werden können. Anhand mehrerer Fahrdynamiksimulationen, die sowohl auf der virtuellen Straße als auch auf dem virtuellen Prüfstand gerechnet wurden, konnte neben den Prüfstandsanforderungen auch der Einfluss der Prüfstandsumgebung auf die Messergebnisse identifiziert werden. Da für beide Simulationsvarianten dieselben Modelle von Fahrer, Fahrzeug, Fahrbahn und Reifen verwendet wurden, können die Unterschiede in den Simulationsergebnissen direkt dem Einfluss des Prüfstandsversuchs zugeordnet werden.