TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

LKT

Christian Angrick

Subsystemmethodik für die Auslegung des niederfrequenten Schwingungskomforts von PKW

Schriftenreihe des Lehrstuhls Kraftfahrzeugtechnik
Herausgeber Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop Band 5

Schriftenreihe des Lehrstuhls
Kraftfahrzeugtechnik

Herausgeber Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop

Band 5

ISSN 2509-694X

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Fakultät Verkehrswissenschaften "Friedrich List" Institut für Automobiltechnik Dresden - IAD

Lehrstuhl für Kraftfahrzeugtechnik

SUBSYSTEMMETHODIK FÜR DIE AUSLEGUNG DES NIEDERFREQUENTEN SCHWINGUNGSKOMFORTS VON PKW

Christian Angrick

Geboren am: 1. September 1987 in Erfurt

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR (DR.-ING.)

Erstgutachter

Prof. Dr.-Ing. Günther Prokop

Zweitgutachter

Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner

Eingereicht am: 17. März 2017

Verteidigt am: 14. August 2017

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.
1. Aufl. - Göttingen: Cuvillier, 2017
Zugl.: (TU) Dresden, Univ., Diss., 2017

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2017
Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen
Telefon: 0551-54724-0
Telefax: 0551-54724-21
www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.
1. Auflage, 2017
Gedruckt auf umweltfreundlichem, säurefreiem Papier
aus nachhaltiger Forstwirtschaft.

ISBN 978-3-7369-9669-4
eISBN 978-3-7369-8669-5

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

DANKSAGUNG

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Man merkt nie, was schon getan wurde, man sieht immer nur, was noch zu tun bleibt.

(Marie Curie)

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Kraftfahrzeugtechnik der TU Dresden.
Ich möchte mich an dieser Stelle zunächst bei meinem Doktorvater, Professor Dr.-Ing. Günther Prokop, bedanken, der einerseits die Durchführung dieser Forschungsarbeit ermöglichte, jedoch auch durch seine fortlaufend fachliche und überfachliche Unterstützung einen großen Anteil an deren Gelingen hatte. Seitens der Audi AG danke ich insbesondere Dr.-Ing. Armin Schöpfel, Dr.-Ing. Andreas Wagner und Dr.-Ing. Peter Knauer, welche zusammen mit Professor Dr.-Ing. Günther Prokop das Thema initiiert sowie mir die Möglichkeit gegeben haben, diese in Kooperation mit der Abteilung EF-13 durchzuführen. Auch bei ihnen möchte ich mich für die regelmäßigen fachlichen Diskussionen und das Bereitstellen optimaler Bedingungen in der Abteilung bedanken, welche die Durchführung der Arbeit unter kontinuierlicher Berücksichtigung methodischer und praktischer Aspekte ermöglichte. Insbesondere möchte ich dabei Dr.-Ing. Peter Knauer hervorheben, der mit regelmäßigen Diskussionen und dem kritischen Hinterfragen jedes Sachverhalts wesentlich das Gesamtbild der Arbeit beeinflusst hat.
Desweiteren möchte ich Prof. Dr. rer. nat. Hermann Winner für das Interesse an der Arbeit, die Unterstützung bei deren Finalisierung und die bereitwillige Übernahme des zweiten Gutachtens danken. Darüber hinaus danke ich Prof. Dr.-Ing. Michael Beitelschmidt für die Übernahme der Zweitprüfung und die Teilnahme an der Prüfungskommission.
Meine besondere Anerkennung gilt weiterhin allen Kollegen am Lehrstuhl für Kraftfahrzeugtechnik und dem Institut für Automobiltechnik der TU Dresden. Besonders hervorheben möchte ich dabei Dr.-Ing. Denise Beitelschmidt, Dr.-Ing. Kay Büttner und Jan Kubenz, welche mich sowohl organisatorisch als auch fachlich betreut und damit ebenfalls wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen haben. Weiterhin bedanke ich mich bei Hendrik Abel, Axel Bindauf und Dr.-Ing. Sebastiaan van Putten für die regelmäßigen fachlichen Diskussionen, welche dazu beigetragen haben, auftretende Problemstellungen noch einmal aus einer anderen Perspektive zu betrachten. Für die Durchführung von Prüfstandsmessungen richtet sich mein Dank insbesondere an Stefan Eckert, Erik Deunert, Hans Unger und Maik Junge, welche nicht nur einen hohen Anteil an Messaufgaben übernommen haben, sondern auch in kürzester Zeit den Aufbau, die Einrichtung und den Umbau des Achsprüfstandes durchführten. Weiterhin soll die Unterstützung durch Willi Westphal, Philip Dziuba und Lukas Meißner nicht unerwähnt bleiben.
Bei der Abteilung EF-13 möchte ich mich für die fortlaufend angenehme Arbeitsatmosphäre während des Projektes bedanken. Weiterhin bedanke ich mich bei allen Kollegen von EF-13 sowie anderen Abteilungen, welche mich immer bereitwillig fachlich oder organisatorisch unterstützt haben. Für fruchtbare fachliche Diskussionen richtet sich mein Dank insbesondere auch an Wilhelm Zipperer, Robert Clauß und Helmut Krome.
Nicht zuletzt bedanke ich mich noch einmal bei allen von mir betreuten Studenten, welche durch ihre Untersuchungen ebenfalls wesentlich zum Gesamtbild der Arbeit beigetragen haben.
Ein ganz besonderer Dank richtet sich an meine Eltern Matthias und Birgit sowie meine Freundin Jenny, welche mich immer unabhängig von der Situation fortlaufend moralisch unterstützen und auf die ich mich immer verlassen kann.
Dr.-Ing. Peter Knauer, Hendrik Abel sowie meinem Vater Matthias danke ich darüber hinaus noch für das hervorragende Korrekturlesen der Arbeit und das konstruktive Hinterfragen verschiedenster Sachverhalte.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

KURZFASSUNG

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Für die Definition eines effizienten Entwicklungsprozesses von Kraftfahrzeugen ist eine strukturierte Prozesskette erforderlich, welche die Bestimmung von Anforderungen an Fahrzeugeigenschaften bereits in möglichst frühen Phasen zulässt. Wie durch die Literatur aufgezeigt wird, ist der Prozess in der Fahrdynamik dahingehend weiter fortgeschritten als der des Fahrkomforts. Dies ist maßgeblich auf eine fehlende Subsystemebene in der Eigenschaftsableitung des Fahrkomforts zurückzuführen, welche in der Fahrdynamik mit Hilfe von konzeptunabhängigen nichtlinearen Ein- und Zweispurmodellen realisiert ist.
Die in der vorliegenden Arbeit vorgestellte Subsystemmethodik im Fahrkomfort wird grundsätzlich durch ein Modell, die zugehörige Parametrierung sowie die Einordnung im Entwicklungsprozess beschrieben. Als Grundlage der Methodik werden zunächst die Eigenschaften relevanter Fahrzeugsubsysteme analysiert. In dem Zusammenhang werden Fahrwerk, Aggregat, Hilfsrahmen und Differenzial am Beispiel eines Referenzfahrzeugs untersucht. Durch das Verständnis des zugehörigen dynamischen Systemverhaltens können allgemeingültige konzeptunabhängige Zusammenhänge abgeleitet werden.
Die Fahrwerke werden an einem dynamischen Achsprüfstand in Vertikal- und Längsrichtung angeregt und die Systemreaktionen analysiert. Statisch ist dabei in Vertikalrichtung die Zusammensetzung der radbezogenen Kraft-Weg-Hysterese entlang der kinematischen Einfederbewegung von Bedeutung. Diese ist vorwiegend durch Feder- und Reibungskräfte der einzelnen Komponenten geprägt. Dynamisch sind weiterhin Dämpfer und Domlager von wesentlicher Bedeutung, während die aus den Gummilagern resultierenden Dämpfungen für die Vertikalrichtung nur eine untergeordnete Rolle spielen. In Längsrichtung ist das Systemverhalten grundsätzlich vergleichbar, jedoch stehen in dem Fall vorwiegend die Steifigkeits-, Reibungs- und Dämpfungseigenschaften der Gummilager im Vordergrund.
Um verallgemeinerte Eigenschaften für die Aggregat-, Hilfsrahmen- und Differenziallagerungen ableiten zu können, werden deren Übertragungsmatrizen insbesondere hinsichtlich Symmetrien und Wechselwirkungen in den unterschiedlichen Freiheitsgraden untersucht. Die Motorlagerung ist dabei aufgrund der verwendeten Hydrolager teilweise asymmetrisch, während die Hilfsrahmen- und Differenziallagerungen als nahezu symmetrisch angesehen werden können.
Die Subsystemmethodik ist maßgeblich durch einen neu entwickelten Gesamtfahrzeugmodellansatz geprägt, welcher im Gegensatz zu konventionellen Mehrkörper-Modellen die Simulation objektiver Fahrkomforteigenschaften auf Basis von Subsystemeigenschaften ermöglicht. Das Fahrwerk wird dahingehend mit Hilfe von einer konzeptunabhängigen Kinematik und Elastokinematik modelliert. Aggregat-, Hilfsrahmen- und Differenziallagerung werden wiederum mit Hilfe einer allgemeingültigen Methode zur Abbildung elastisch gelagerter Subsysteme beschrieben. Die Parameterauswahl richtet sich nach Abbildungsgenauigkeit, Parametrierbarkeit und Verständlichkeit in der Prozessanwendung.
Die Parametrierung des Modellansatzes erfolgt teilweise auf Basis von bereits konventionell eingesetzten Prüfständen, wie statischen Achsprüfständen oder Reifenprüfständen. Weiterhin wird jedoch aufgezeigt, dass zur vollständigen Bedatung des Subsystemmodells dynamische Achsprüfstände und Gesamtfahrzeugtests verwendet werden können.
Die Einordnung der Methodik im Prozess orientiert sich an der Eigenschaftsableitung ausgehend von der Gesamtfahrzeugebene. Zunächst wird ein Beispiel aus der Wettbewerbsanalyse vorgestellt, in der aufgezeigt wird, inwiefern unterschiedliche Längsbeschleunigungen bei einer Hindernisüberfahrt durch zwei Wettbewerberfahrzeuge auf unterschiedliche Subsystemeigenschaften zurückzuführen sind. Anschließend werden die Abhängigkeiten zwischen Gesamtfahrzeugkennwerten und Subsystemeigenschaften erläutert. Weiterhin wird das Vorgehen zur Ableitung von Komponenten- aus Subsystemeigenschaften aufgezeigt.
Auf Basis der vorgestellten Methodik lässt sich zukünftig ein strukturierter durchgängiger Entwicklungsprozess im Fahrkomfort definieren, welcher eine auf Gesamtfahrzeug-Zielwerten basierte, effiziente Ableitung von Fahrzeugeigenschaften ermöglicht.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

ABSTRACT

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

For defining an efficient automotive development process a structured sequence of processes has to be defined, which allows for the determination of vehicle properties in early phases. On basis of the given literature it is shown, that the corresponding process is more advanced in driving dynamics than in ride comfort. This can be substantially attributed to a missing subsystem level in the property derivation process of ride comfort, which is realised in driving dynamics by the utilization of concept independent nonlinear single- and two-track-models.
The introduced ride comfort subsystem methodology ist basically characterised by a model, the corresponding parametrisation and the implementation within the development process. Operating as a basis for the methodology, first of all relevant vehicle subsystems are analysed. In this context suspension, engine, subframe and the differential of a reference vehicle are investigated. By comprehension of the corresponding dynamic behaviour of the system generally applicable, concept independent relations are derived.
The suspensions are excited in vertical and longitudinal direction on a dynamic axle test rig and the system responses are analysed. Under static conditions the force-displacement-hysteresis along the kinematic wheel travel is of main importance in vertical direction, which is predominantly characterised by spring and friction forces of the individual components. Under dynamic conditions furthermore damper and damper top mount become significant, while the damping of the elastomers can be neglected in vertical direction. In longitudinal direction the system behaviour is basically comparable, though the stiffness, friction and damping properties of the elastomers are most important.
For receiving generalised properties of the engine, subframe and differential mountings, their transfer matrices are especially investigated concerning symmetries and interdependencies in the different degrees of freedom. Thereby the engine mounting is partially asymmetric due to the usage of hydraulic damped elastomers, while the subframe and differential mountings can be considered as nearly symmetric.
The subsystem methodology is significantly characterised by the development of a new full vehicle modeling approach, which compared to conventional multi body simulation models allows for the simulation of objective ride comfort characteristics on basis of subsystem properties. The suspension is thereby modelled with concept independent kinematics and elasto-kinematics. Engine, subframe and differential mountings are modelled with a method for reproducing the behaviour of elasto-kinematically mounted subsystems. The used parameters are chosen on basis of reproduction accuracy, ability for parametrisation and comprehensibility in the process application.
The parametrisation of the modelling approach is partially based on conventionally used test rigs, like static axle test rigs or tyre test rigs. Furthermore it is shown, that for the complete parametrisation of the subsystem model dynamic axle test rigs and full vehicle tests can be used.
The implementation of the methodology in the process is oriented on the property derivation process beginning on full vehicle level. Initially an example of the competition analysis is presented, in which is demonstrated, to what extent different longitudinal accelerations occuring when an obstacle is passed by two competitors can be lead back to differences in their subsystem properties. Subsequenty, the dependencies between full vehicle and subsystem properties are shown on a general basis. Furthermore the procedure for deriving component from subsystem properties is illustrated.
On basis of the depicted methodology in a future prospect a structured integrated development process can be defined for ride comfort, which allows for an efficient derivation of vehicle properties based on full vehicle targets.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

INHALTSVERZEICHNIS

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Danksagung III

Kurzfassung VII

Abstract XI

Nomenklatur XXI

1. Einführung 1
   1.1. Motivation . . . 3
   1.2. Zielstellung und Struktur der Arbeit . . . 3
   1.3. Eingrenzung der Aufgabenstellung . . . 5
   1.4. Begriffsdefinitionen . . . 6

2. Wissenschaftliche Grundlagen 7
   2.1. Automobiler Entwicklungsprozess . . . 9
      2.1.1. Entwicklungsprozess der Fahrdynamik . . . 11
      2.1.2. Entwicklungsprozess des Fahrkomforts . . . 13
   2.2. Fahrkomfort auf Gesamtfahrzeugebene . . . 14
      2.2.1. Definition charakteristischer Schwingungsphänomene . . . 14
      2.2.2. Bewertungsmethoden . . . 16
   2.3. Analyse und Modellierung dynamischer Systeme . . . 18
      2.3.1. Kennwerte für Übertragungseigenschaften . . . 18
      2.3.2. Mechanische Ersatzmodelle . . . 20
      2.3.3. Modellansätze zur Abbildung von Reibungseffekten . . . 23
   2.4. Stand der Forschung zu Eigenschaften von Subsystemen . . . 24
      2.4.1. Aufbauschwingungsverhalten . . . 24
      2.4.2. Fahrwerkseigenschaften . . . 26
      2.4.3. Rad/Reifengefederte Masse mit Reifen . . . 34
      2.4.4. Aggregat . . . 38
      2.4.5. Hilfsrahmen und Differenzial . . . 43
      2.4.6. Weitere Subsysteme . . . 44
   2.5. Abstrakte Modellansätze zur Abbildung des Schwingungskomforts auf Gesamtfahrzeugebene . . . 46
   2.6. Zusammenfassung des Stands der Forschung und Diskussion hinsichtlich der Zielvorstellung . . . 47

3. Methodische Mittel zur Ableitung der Subsystemmethodik 49
   3.1. Effiziente Identifikation des frequenzabhängigen Übertragungsverhaltens von Systemen . . . 51
   3.2. Versuchstechnik . . . 55
      3.2.1. Referenzfahrzeug . . . 55
      3.2.2. Kinematics and Compliance Prüfstand . . . 56
      3.2.3. Dynamischer Achsprüfstand . . . 57
      3.2.4. Dynamischer Kinematics and Compliance Prüfstand . . . 60
   3.3. Methode der Analyse und Abstraktion von Subsystemen . . . 61
      3.3.1. Definition der Subsystem-Blackbox und Übertragungsmatrix . . . 61
      3.3.2. Analyse und Modifikation der Übertragungsmatrix . . . 63

4. Charakterisierung der Übertragungseigenschaften von Subsystemen 65
   4.1. Einfluss von Subsystemen auf das Gesamtfahrzeug . . . 67

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

4.2. Fahrwerk mit starr angebundenem Hilfsrahmen 69
4.2.1. Definition kinematischer, elastokinematischer und dynamischer Fahrwerkseigenschaften auf Basis einer Subsystem-Übertragungsmatrix 70
4.2.2. Statische elastische Eigenschaften 77
4.2.3. Nichtlineare statische Reibungseffekte 79
4.2.4. Dynamische Eigenschaften 82
4.3. Fahrwerk mit elastisch gelagertem Hilfsrahmen und Differenzial 86
4.3.1. Statische elastische Eigenschaften 86
4.3.2. Nichtlineare statische Reibungseffekte 90
4.3.3. Dynamische Eigenschaften 93
4.4. Aggregat 96
4.4.1. Schwingverhalten ohne Berücksichtigung von Hydrolagern 96
4.4.2. Schwingverhalten unter Berücksichtigung von Hydrolagern 97
4.5. Diskussion der Subsystemeigenschaften 100

5. Erstellung eines Konzeptmodells auf Subsystemebene 103
5.1. Kriterien zur Auswahl von Subsystemkennwerten 107
5.2. Allgemeingültiger nichtlinearer Abstraktionsansatz für Subsysteme 108
5.2.1. Formulierung mittels elastischer Drehpole 108
5.2.2. Vereinfachungen durch symmetrische Systeme 110
5.2.3. Diskussion des Ansatzes 112
5.3. Subsystemmodellierung des Fahrwerks 113
5.3.1. Modellierung des vertikalen Übertragungspfades 114
5.3.2. Modellierung der Fahrwerkskinematik 116
5.3.3. Modellierung der Fahrwerkselastokinematik 118
5.3.4. Modellierung der Fahrwerksreibung 120
5.3.5. Validierung des Subsystemansatzes auf Achsebene 123
5.4. Subsystemmodellierung der Hilfsrahmen- und Differenziallagerung 124
5.5. Subsystemmodellierung der Aggregatlagerung 126
5.6. Zusammenfassung und Diskussion zur Modellierung unter Verwendung von Subsystemparametern 127

6. Parametrierungskonzept 129
6.1. Übersicht über Parametrierungsverfahren 131
6.2. Parametrierung von Fahrwerkseigenschaften 133
6.2.1. Statische Fahrwerkseigenschaften 133
6.2.2. Dynamische Fahrwerkseigenschaften 136
6.3. Parametrierung von Eigenschaften der Hilfsrahmen- und Differenziallagerung 139
6.3.1. Parametrierung statischer Eigenschaften der Hilfsrahmenlagerung . 139
6.3.2. Parametrierung dynamischer Eigenschaften der Hilfsrahmen- und Differenziallagerung 143
6.4. Parametrierung der Aggregatlagerung 145
6.5. Diskussion zum Stand des Parametrierungsvorgehens 148

7. Prozessdefinition mit Integration der Subsystemmethodik 149
7.1. Abhängigkeit des Fahrzeugschwingungsverhaltens von Subsystemparametern 152
7.1.1. Einfluss der Fahrwerkslängssteifigkeit 152
7.1.2. Einfluss des Fahrwerksschrägfederungswinkels 153
7.1.3. Einfluss der Fahrwerksreibung 155
7.2. Wettbewerbsanalyse auf Gesamtfahrzeugebene 163

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

7.3. Ableitungsprozess von Gesamtfahrzeug- zu Subsystemeigenschaften . . . 167
7.3.1. Einfluss von Subsystemparametern auf niederfrequente Aufbauschwingungen . . . 171
7.3.2. Einfluss von Subsystemparametern auf das Fahrzeugstuckern . . . 173
7.3.3. Einfluss von Subsystemparametern auf das Schwingungsverhalten bei Kantenüberfahrt . . . 174
7.3.4. Zusammenfassung der Ergebnisse und Handlungsableitung . . . 175
7.4. Ableitungsprozess von Subsystem- zu Komponenteneigenschaften . . . 176
7.4.1. Elastische Lagerungen . . . 176
7.4.2. Fahrwerkskonzepte . . . 179

8. Zusammenfassung und Ausblick 181

Literaturverzeichnis XXXIII

Abkürzungsverzeichnis XLIX

A. Anhang LXIII
A.1. Translation von Steifigkeitsmatrizen . . . LXV
A.2. Reproduzierbarkeit der Reibungsmessungen . . . LXVI
A.3. Dynamische Reibungseffekte . . . LXVII
A.4. Kräfte- und Momentengleichgewichte für wechselseitige Längsanregungen im Radmittel- und Radaufstandspunkt bei elastisch gelagertem Hilfsrahmen . . . LXVIII

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

NOMENKLATUR

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.

ALLGEMEINE SCHREIBWEISE

Größe	Schreibweise	Beispiele
Skalar	kleiner oder großer Buchstabe	h, A, α
Vektor	Vektorpfeil über Buchstabe	$\vec{F}$
Matrix	fett gedruckter großer Buchstabe	$\boldsymbol{C}$
Komplexe Größe	unterstrichener Buchstabe	$\underline{H}$

FORMELZEICHENVERZEICHNIS

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
A	-	Bezugspunkt für die Matrixtransformation
$\boldsymbol{A}$	differierend	Steifigkeitsmatrix der Hilfsrahmenlagerung für den wechselseitigen Versuch
a	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$	Beschleunigung
$\underline{a}$	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$	Beschleunigung im Frequenzbereich
$\hat{a}$	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$	Amplitude der Beschleunigung
a_H	differierend	Realteil einer Übertragungsfunktion
a_{HReib}	$\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$	Realteil der Längsreibung
a_{ij}	–	Übersetzung zwischen zwei Bewegungskoordinaten
$\underline{a}_{u\mathrm{Diff}}$	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$	Beschleunigung des Differenzials
$\underline{a}_{u\mathrm{HR}}$	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$	Beschleunigung des Hilfsrahmens
$\underline{a}_{u\mathrm{RT}}$	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$	Beschleunigung des Radträgers
a_{w}	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$	Frequenzbewertete zeitabhängige Beschleunigung
$a_{\mathrm{w}T}$	$\frac{\mathrm{m}}{\mathrm{s}^2}$	Quadratischer Mittelwert der frequenzbewerteten zeitabhängigen Beschleunigung
B	-	Bezugspunkt für die Matrixtransformation
b	$\frac{\mathrm{Ns}}{\mathrm{m}}$	Anstieg der Rampe im Übergangsbereich des Coulombschen Reibelements
b_H	differierend	Imaginärteil einer Übertragungsfunktion
b_{HReib}	$\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{m}}$	Imaginärteil der Längsreibung
$C_{1\mathrm{t}}$	–	Skalierungsfaktor für Höhe und Winkel der effektiven Reifenkontaktfläche
$C_{2\mathrm{t}}$	–	Skalierungsfaktor für den Winkel der effektiven Reifenkontaktfläche
$C_{\mathrm{E}ij}$	differierend	Komponenten der Steifigkeitsmatrix für die Längs- und Spinelastokinematik
$C_{\mathrm{E}ij\mathrm{KP}}$	differierend	Komponenten der Steifigkeitsmatrix für die Längs- und Spinelastokinematik an den kinematischen Polen

Dieses Werk ist copyrightgeschützt und darf in keiner Form vervielfältigt werden noch an Dritte weitergegeben werden.
Es gilt nur für den persönlichen Gebrauch.