

Schriftenreihe
Fahrzeugdynamik und Aktive Systeme
am Institut für Fahrzeugtechnik,
TU Braunschweig



Nr: 6

Dipl.-Ing. Univ.
Andreas Apfelbeck
2021

Objektivierung der Wankdynamik von Personenkraftwagen

Herausgegeben von:
apl. Prof. Dr.-Ing. Roman Henze

Objektivierung der Wankdynamik von Personenkraftwagen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carola-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Ing. Univ. Andreas Michael Bernhard Apfelbeck
geboren in: Landshut

eingereicht am: 18.01.2021

mündliche Prüfung am: 21.05.2021

Vorsitz: Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor

Gutachter: apl. Prof. Dr.-Ing. Roman Henze

Prof. Dr. Mark Vollrath

Schriftenreihe Fahrzeugdynamik und Aktive Systeme
am Institut für Fahrzeugtechnik, TU Braunschweig

Band 6

Andreas Michael Bernhard Apfelbeck

**Objektivierung der Wankdynamik
von Personenkraftwagen**

Shaker Verlag
Düren 2021

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.

Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8156-5

ISSN 2700-046X

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Doktorand im Entwicklungsbereich Fahrdynamik bei der BMW Group in München. Mein besonderer Dank gilt dabei meinem Doktorvater Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. Roman Henze vom Institut für Fahrzeugtechnik der Technischen Universität Braunschweig für die Erstbetreuung und Begutachtung dieser Arbeit, den fachlichen Austausch, die vielen wertvollen Hinweise und die Unterstützung während der Entstehung dieser Arbeit.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor danke ich für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission ebenso wie Herrn Prof. Dr. Mark Vollrath für die Bereitschaft, als Zweitgutachter meiner Dissertation zu fungieren.

Von der BMW Group möchte ich insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Stefan Wegner danken, der diese Arbeit bei der BMW Group begleitet und durch seine stete Unterstützung einen erfolgreichen Abschluss ermöglicht hat. Auch möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Martin Schwarz ebenso wie Herrn Dipl.-Ing. Reinhard Mühlbauer und Herrn Dr.-Ing. Jürgen Guldner danken, die diese Arbeit bei der BMW Group ermöglicht haben, und schließlich auch all meinen Kolleginnen und Kollegen, die durch ihre Unterstützung zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen haben.

München, Januar 2021

Andreas Apfelbeck

Kurzfassung

Objektivierung der Wankdynamik von Personenkraftwagen

Die subjektive Wahrnehmung von Fahrdynamikaspekten wird in der Automobilindustrie häufig in objektive Kennparameter übersetzt. Für die Wankdynamik existieren bisher allerdings nur Modelle, die lediglich Teilaspekte beschreiben oder nicht bzw. kaum validiert wurden. Ziel dieser Dissertation war daher die Identifikation von Regressionsmodellen, die eine robuste Prädiktion von Subjektivbewertungen verschiedener Wankdynamikaspekte auf Basis von Messdaten erlauben. Dabei wurde sowohl quasi-stationäres als auch dynamisches Wanken untersucht. Anwendungsmöglichkeiten der Ergebnisse finden sich vor allem in der virtuellen Grundausslegung und Simulation sowie beim objektiven Vergleich von Fahrzeugen.

Hinsichtlich des quasi-stationären Wankens konnten bisherige Aussagen zum Wankwinkelverlauf über der Querbeschleunigung, dass ein möglichst linearer Verlauf mit geringem Gradienten anzustreben wäre, bestätigt werden. So wurden in einer Studie fünf Varianten von 15 Probanden beurteilt sowie in der quasi-stationären Kreisfahrt vermessen. Anschließend wurde auf Basis dieser Daten ein Regressionsmodell abgeleitet, das mit einem angepassten Bestimmtheitsmaß von $R_{adj}^2 = 0,94$ den positiven Einfluss eines flachen linearen Wankwinkel-Querbeschleunigung-Gradienten auf den subjektiven Fahrindruck feststellte.

Zur Vorbereitung der Studien zum dynamischen Wanken beurteilten 42 Probanden (Normal- und Expertenfahrer) Wankabstützung, Zeitverzug der Wankreaktion und Nachwanken in einer Fahrsimulatorstudie. Die Probanden bevorzugten geringe Wankwinkel (Korrelationskoeffizient $r = 0,86$, p-Wert $p = 0,00$) sowie ein möglichst geringes Nachwanken ($r = 0,89$; $p = 0,01$). Die Variation des Zeitverzugs hingegen konnte nicht statistisch signifikant differenziert werden ($r = 0,27$; $p = 0,43$). Normal- und Expertenfahrer bevorzugten im Mittel ein ähnliches Wankverhalten, wobei die Expertenfahrer ein Mindestmaß an Wankbewegung erwarteten, um ausreichend Rückmeldung über den Fahrzeugzustand zu erhalten.

Zur Untersuchung des dynamischen Wankens wurden vier Realfahrzeug-Probandenstudien durchgeführt und die folgenden Kriterien beurteilt: Wankabstützung und Zeitverzug der Wankreaktion jeweils im nieder- und höherfrequenten Anregungsbereich, Anwanken, Nachwanken und der Gesamteindruck der Wankdynamik. In der initialen Studie wurde die Wankdynamik eines Referenzfahrzeugs durch Änderung der Bedatung der Lenkung, der Dämpfer und der Wankstabilisierung erzeugt und von den Probanden bewertet. Die anschließend identifizierten Zusammenhänge zwischen Kennparametern und Subjektiveindruck wurden mit den Daten unterschiedlicher Fahrzeuge aus den drei darauffolgenden Studien validiert und iterativ verbessert. In Summe wurden so 17 Varianten beurteilt, die vom Kompaktwagen bis zu SUVs und Luxusfahrzeugen reichten, und Modelle abgeleitet, die mit hoher Genauigkeit die Gefallensbewertungen für die sieben Wankdynamikkriterien präzisieren konnten.

($R_{adj}^2 \geq 0,87$ für alle Modelle). Gleichzeitig wurde auf Plausibilität der verwendeten Kennparameter geachtet. Dabei wurde u. a. festgestellt, dass ein nicht vernachlässigbarer Einfluss des Lenkmoments auf die Wahrnehmung der Wankdynamik vorliegt und dass ein möglichst konstanter Verlauf der Wankverstärkung im Frequenzbereich bis ca. 2 Hz zu höheren Subjektivbewertungen führt.

Abstract

Quantification of vehicle roll dynamics

Subjective impressions of a passenger car's dynamics are often translated into objective measures during vehicle development. However, existing objective models for vehicle roll dynamics tend to either be oversimplified or lack comprehensive validation. The main objective of this PhD thesis was to identify regression models that reliably forecast subjective ratings based on vehicle measurement data. The research considered both quasi-steady state and dynamic roll motions. Potential applications of the results include the virtual basic design and simulation of vehicles, as well as objective comparisons between vehicles.

Previous statements about the quasi-steady roll angle gradient (for example, that a smaller linear gradient is desirable) were first examined by having 15 test drivers rate five vehicle variants featuring different roll angle gradients. In addition, the roll behavior of the vehicles was also measured during quasi-steady state cornering. A regression model with an adjusted coefficient of determination of $R_{adj}^2 = 0.94$ was identified from the collected data, suggesting that a small linear roll angle gradient had a positive influence on the satisfaction ratings.

Dynamic roll motions were subsequently evaluated on a driving simulator, where 42 test persons (normal and expert drivers) rated the roll stabilization, roll time delay and the attenuation of the roll motions of a vehicle. The drivers generally preferred small absolute roll angles (correlation coefficient $r = 0.86$, p-value $p = 0.00$) and minimal roll angle overshoot ($r = 0.89$, $p = 0.01$), but could not identify differences between variations in the time delay ($r = 0.27$, $p = 0.43$). Overall, the drivers favored a similar roll behavior, but the expert drivers tended to prefer a minimum amount of roll motions, due to the associated feedback about the driving state.

Dynamic roll motions were further investigated by conducting four studies with real vehicles. The studies focused on the following rating criteria: roll stabilization and time delays each both at lower and higher excitation frequencies, initial roll motion, roll angle overshoot and the overall vehicle impression. In the initial study, test drivers rated a reference vehicle whose roll dynamics was varied by adjusting the calibration of the steering, dampers and roll stabilization. The resulting relationships between characteristic values and the subjective ratings were validated and iteratively improved upon with data from the three follow-up studies that featured additional vehicles. In sum, 17 variants were rated covering segments ranging from subcompact to off-road and ultra-luxury cars, and models were identified that predicted the drivers' subjective impressions for the seven roll dynamics criteria with high accuracy ($R_{adj}^2 \geq 0.87$ across all models). At the same time, CVs were selected for the models by di-

rectly considering the physical phenomena underpinning the given rating criteria. A significant influence of driver steering torque on the perception of vehicle roll motions was observed in the investigations with six of the seven models using steering torque CVs. Additionally, a constant roll gain up to frequencies of about 2 Hz was found to have a positive influence on the subjective ratings.

Inhalt

Formelzeichen, Abkürzungen und Indizes	III
1. Einleitung	1
1.1. Zielsetzung der Arbeit	2
1.2. Methodik und Vorgehensweise	2
2. Stand der Forschung und Technik	5
2.1. Subjektive Bewertung von Fahreigenschaften	5
2.2. Bewertungsverfahren und -kriterien zur Objektivierung	6
2.3. Fahrzeugwankdynamik und Beeinflussungsmöglichkeiten	18
3. Vergleich der Beurteilungen von Normal- und Expertenfahrern	23
3.1. Design der Fahrsimulator-Studie	23
3.2. Objektive Kennparameter	28
3.3. Aufbereitung und Analyse der Subjektivbewertungen	30
3.4. Korrelationsanalyse der Subjektivbewertungen	33
3.5. Vergleich der beiden Probandengruppen	37
4. Objektives Wankverhalten am Versuchsträger	43
4.1. Anregungsfrequenzen der Fahrzeug-Wankdynamik	43
4.2. Einfluss der Wankträgheit auf objektive Fahreigenschaften	45
5. Objektivierung des quasi-stationären Wankens	51
5.1. Design der Realfahrzeug-Studie	51
5.2. Objektive Kennparameter aus der quasi-stationären Kreisfahrt	53
5.3. Analyse der Subjektivbewertungen	55
5.4. Korrelations- und Regressionsanalyse der Subjektivbewertungen und objektiven Kennparameter	57

6. Objektivierung des Übergangsverhaltens der Wankdynamik	61
6.1. Design der vier Realfahrzeug-Studien.....	62
6.2. Objektive Kennparameter aus den Fahrzeugmessungen	68
6.3. Analyse der Subjektivbewertungen	83
6.4. Kombination der Bewertungen der individuellen Studien	89
6.5. Korrelationsanalysen der Subjektivbewertungen mit den Kennparametern	92
6.6. Prädiktion der Gefällensbewertungen durch Regressionsmodelle	101
7. Zusammenfassung	121
Anhang.....	123
Abbildungsverzeichnis	151
Tabellenverzeichnis	159
Literaturverzeichnis	163