

Philipp Grönefeld

**Experimentelle Untersuchung und
modulare Modellierung der Dynamik
von PKW-Scheibenwischersystemen**



Institut für Dynamik und Schwingungen
Leibniz Universität Hannover

Berichte aus dem IDS

Wissenschaftliche Schriftenreihe des
Instituts für Dynamik und Schwingungen
der Leibniz Universität Hannover

Herausgeber:
Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek

Zugleich: Dissertation,
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, 2014

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.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Alle Rechte, auch das des Nachdruckes, der Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung des vollständigen Werkes oder von Teilen davon, sind vorbehalten.

© TEWISS – Technik und Wissen GmbH, 2014
An der Universität 2 • 30823 Garbsen
Tel: 0511-762-19434 • Fax: 0511-762-18037
www.pzh-verlag.de • mail: info@pzh-verlag.de

ISBN 978-3-944586-42-7
ISSN 1868-1999

Verlag: TEWISS – Technik und Wissen GmbH

Herstellung: Digital Print, Garbsen
Printed in Germany

Experimentelle Untersuchung und modulare Modellierung der Dynamik von PKW-Scheibenwischersystemen

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
genehmigte

Dissertation

von
Dipl.-Ing. Philipp Grönfeld
geb. am 19. Januar 1980 in Nordhorn

2013

1. Referent: Prof. Dr.-Ing. J. Wallaschek
2. Referent: Prof. Dr.-Ing. G. Poll
Tag der Promotion: 20. Dezember 2013

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Dynamik und Schwingungen der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Jörg Wallaschek für sein stetiges Interesse an der Thematik und die eingeräumten wissenschaftlichen Freiräume. Insbesondere danke ich ihm für die Motivation auch in schwierigen Phasen der Entstehung dieser Arbeit.

Des Weiteren möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerhard Poll für das Interesse an meiner Arbeit sowie die Übernahme des zweiten Referats bedanken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Lutz Rissing sei für den Vorsitz der Prüfungskommission gedankt.

Allen ehemaligen Kollegen des Instituts für Dynamik und Schwingungen danke ich für die angenehme Arbeitsatmosphäre, die viele auch abseits der Arbeit verbrachte Zeit und die unzähligen Kaffees. Namentlich hervorheben möchte ich die Herren Dr.-Ing. Lars Panning, Dr.-Ing. Stefan Ripka, Dipl.-Ing. Sebastian Tatzko sowie Dr.-Ing. Matthias Wangenheim. Ebenso gilt mein Dank meinem früheren und jetzigen Kollegen Herrn Dr.-Ing. Gunnar Simon Gäbel, dessen Motivation und wertvolle Hinweise sehr zur Fertigstellung der vorliegenden Arbeit beigetragen haben.

Ausdrücklich bedanken möchte ich mich auch bei meiner ganzen Familie, die mich in meinem Werdegang immer unterstützt und bestärkt hat. Abschließend danke ich von Herzen meiner Frau Tanja, die mir stets den Rücken frei gehalten und alles dafür getan hat, mir zeitliche Freiräume zur Fertigstellung dieser Arbeit einzuräumen.

Philipp Grönefeld

Hannover, im Dezember 2013

Inhaltsverzeichnis

Formelverzeichnis	VI
Kurzfassung	VIII
Abstract	IX
1 Einleitung	1
1.1 Historie von Scheibenwischersystemen	1
1.2 Problemstellung	2
1.3 Gummieigenschaften und Gummireibung	4
1.4 Zielsetzung der Arbeit	6
1.5 Modularer Aufbau des entwickelten Scheibenwischermodells	7
2 Stand der Forschung und der Technik	10
2.1 Bauarten von Scheibenwischeranlagen	11
2.2 Theoretische Untersuchungen und Modellierungsansätze	12
2.2.1 Ansätze zur Modellierung des Wischers	13
2.2.2 Modellierungsansätze für das gesamte Scheibenwischersystem . . .	17
2.2.3 Modellierung des Richtungsumkehrpunktes	21
2.2.4 Kontaktmodellierung des Wischerblatts	24
2.3 Experimentelle Untersuchungen an Scheibenwischern	26
2.3.1 Allgemeine Experimentelle Untersuchungen	26
2.3.2 Maßnahmen zur Schwingungsreduktion	31
2.3.3 Messmethoden	34
2.4 Dynamische Effekte im Reibkontakt	36
3 Stick-Slip-Punktkontaktmodell	39
3.1 Modellierung	39
3.1.1 Definition der zu modellierenden Scheibenwischergeometrie	39
3.1.2 Einmassen-Reibschwinger	40
3.2 Parameteridentifikation	43
3.2.1 Tangentialsteifigkeit	43
3.2.2 Dämpfungsgrad	46
3.2.3 Weitere Parameter	47
3.3 Validierung des Modells	47

3.3.1	Experimentelle Untersuchung der Stick-Slip-Dynamik	48
3.3.2	Vergleich Experiment - Simulation	50
4	Srag-Slip-Punktkontaktmodell	52
4.1	Grundlagen der Srag-Slip-Modellierung	52
4.1.1	Das lineare Komplementaritätsproblem	53
4.1.2	Das PAINLEVÉ'sche Paradoxon	58
4.1.2.1	Das Beispiel von PAINLEVÉ	58
4.1.2.2	Inkonsistenz und Unbestimmtheit der Lösung	61
4.2	Modellierung	64
4.2.1	Bewegungsgleichungen	65
4.2.2	Bewegungszustände	67
4.2.2.1	Haften	67
4.2.2.2	Gleiten	68
4.2.2.3	Kontaktloser Zustand mit freier Schwingung	70
4.2.3	Übergangsbedingungen	70
4.2.3.1	Haft-Gleit-Übergänge	70
4.2.3.2	Separation	74
4.2.3.3	Übergang von der freien Schwingung zum Kontakt	78
4.2.4	Simulationsergebnisse	83
4.3	Fazit	87
5	Kopplung von Stick-Slip- & Srag-Slip-Modell	88
5.1	Modellierung	88
5.1.1	Umsetzung der Kopplung	88
5.1.2	Parameterübergabe	90
5.1.3	Initialisierung der Parameter	91
5.2	Simulationsergebnisse	92
6	Erweiterung auf räumliches Modell der Mehrpunktkontakte	96
6.1	Grundlagen der Kopplung von Schwingkörpern	96
6.1.1	Zweimassenkopplung	96
6.1.2	Fünfmassenkopplung	98
6.1.3	N-Massenkopplung	100
6.2	Modellierung der Submodellkopplung	101
6.2.1	Koppelbedingungen	102
6.2.2	Bewegungsgleichungen	103
6.3	Simulationsergebnisse	107
6.4	Fazit	110
7	Zusammenfassung	111
	Literaturverzeichnis	113

Formelverzeichnis

Selten benutzte Formelzeichen und Begriffe sowie abweichende Bedeutungen werden ausschließlich im Text erläutert. Vektorielle Größen werden im Allgemeinen durch fette Kleinbuchstaben, matrizielle Größen durch fette Großbuchstaben gekennzeichnet. Die Elemente einer als Vektor oder Matrix im Fettdruck definierten Größe treten im Text auch als skalare Größen auf und werden im Formelverzeichnis nicht redundant aufgeführt.

Lateinische Notation

c	Federsteifigkeit
c_φ	Drehfedersteifigkeit
d	Dämpferkonstante
d_φ	Drehdämpferkonstante
D	Dämpfungsgrad
E_{kin}	Kinetische Energie
E_{pot}	Potentielle Energie
f	Anzahl der Freiheitsgrade
f_0	Eigenfrequenz
F_{H}	Haftkraft
F_{Hk}	Haftkraftreserve
F_{N}	Normalkraft
F_{R}	Reibkraft
F_{t}	Tangentialkraft
g	Erdbeschleunigungskonstante
J_{C}	Massenträgheitsmoment um den Schwerpunkt
m	Masse
m_{dyn}	Dynamische Masse
$Q_{\text{n}}^{\text{n.k.}}$	nichtkonservative Kräfte
t	Zeit
T	Periodendauer
u	globale Variable zur Beschreibung des aktuellen Kontaktzustandes
v	Allgemeine Geschwindigkeitsangabe
v_{B}	Bandgeschwindigkeit
v_{rel}	Relativgeschwindigkeit
\dot{x}_{k}	Relativgeschwindigkeit im Kontakt

x_S	Verschiebung des Schlittens des Universalprüfstandes
x_W	Auslenkung der Scheibenwischerlippe
z_0	Position, für die die Feder c entspannt ist
z_k	vertikaler Kontaktabstand
\dot{z}_k	Normalgeschwindigkeit im Kontakt
\ddot{z}_k	Normalbeschleunigung im Kontakt

Griechische Notation

φ_0	Position, für die die Drehfeder c_φ entspannt ist
ω_0	Eigenkreisfrequenz
ω_d	Eigenkreisfrequenz bei Dämpfung
Λ	Logarithmisches Dekrement
μ	Reibkoeffizient
μ_C	kritischer Reibwert
$\mu_{C,\min}$	Minimum des kritischen Reibwerts

Vektoren und Matrizen

M	Massenmatrix
\vec{r}	Vektor der äußeren Kräfte
W_N	Transformationsvektor zur Abbildung von F_N auf generalisierten Koordinaten
W_R	Transformationsvektor zur Abbildung von F_R auf generalisierten Koordinaten

Indices und weitere Formelzeichen

$s(\dots)$	Abkürzung in Formeln für „sin(…)“
$c(\dots)$	Abkürzung in Formeln für „cos(…)“

Kurzfassung

Bereits seit der Erfindung von PKW-Scheibenwischersystemen existieren verschiedene Schwingungsphänomene, die während des Betriebes auftreten und aus dem dynamischen Reibverhalten im Gummi-Glas-Kontakt resultieren. Solche Schwingungen verschiedenster Art sind unerwünscht, da sie sowohl sicherheitsrelevant sind als auch durch akustische Beeinträchtigungen den Komfort im Fahrzeug erheblich einschränken. Diese subjektiven Eindrücke während des Betriebes werden im Rahmen der vorliegenden Arbeit mit Hilfe eines modular aufgebauten Modells objektiviert. Dazu werden unterschiedliche Submodelle erzeugt, die jeweils die Abbildung entsprechender Schwingungsphänomene wie den Stick-Slip- sowie den Sprag-Slip-Effekt ermöglichen. Durch eine gezielte Verknüpfung der verschiedenen Effekte wird schließlich das Gesamtschwingverhalten der Scheibenwischerlippe im Betrieb abgebildet und zusätzlich räumlich erweitert. Die Validierung der einzelnen Submodelle geschieht unter Zuhilfenahme geeigneter Prüfstände mit denen das entstehende Quietschen bzw. Rattern nachgebildet werden kann. Dabei werden auch die modellbeschreibenden Parameter identifiziert und den zugehörigen Simulationsmodellen als Eingangsgröße zur Verfügung gestellt. Die Untersuchungen zeigen, dass das Berechnungsmodell die in der Realität entstehenden Schwingungen mit großer Präzision abbildet.

Das entstandene Gesamtmodell dient der Auslegung neuer Scheibenwischer. Durch eine vorherige Abschätzung einflussreicher Parameter lassen sich simulativ bereits Eigenschaften beurteilen, die einen erheblichen Effekt auf das spätere dynamische Verhalten ausüben. So können beispielsweise Parameterbereiche identifiziert werden, die die Ausprägung von selbsterregten Schwingungen besonders begünstigen. Das Aufspüren derartiger Instabilitäten im Voraus verringert die Anzahl der im Rahmen der Neuauslegung und Optimierung notwendigen Prototypen erheblich und trägt somit zur Steigerung der Kosteneffizienz im Entwicklungsprozess bei.

Schlagwörter: Scheibenwischer, selbsterregte Schwingungen, Simulation

Abstract

Since the invention of windscreen wipers different vibration phenomena are existing which appear during operation and which result from friction behaviour in the rubber-glas-contact. These vibrations are undesired since they are not only relevant for security aspects but also do they decrease the comfort in the motor vehicle due to acustical detractio. These subjective impressions during operation are objectified by a modular model in this thesis. Therefore separate submodels are being developed that allow a representation of the respective vibration phenomena like the stick-slip- and the sprag-slip-effect. By a systematic combination of the different effects the overall vibration behaviour can finally be analysed during operation and it can be extended by the addition of the third dimension. The individual submodels' validation is done with the aid of appropriate test rigs which enable the reproduction of occuring squeal or chatter noises. Thereby the model parameters are being identified and afterwards they are being provided as start condition for the corresponding simulation model. Studies show, that the calculation model reproduces the occuring vibrations with great precision.

The developed model can be used on the design of windscreen wipers. Due to a prior estimation characteristics can already be evaluated, which have an immense impact on the vibration dynamics. The detection of instabilities in advance decreases the amount of necessary prototypes for the redesigning and improvement of windscreen wipers and therefore contributes to increase the cost-efficiency in the process of development.

Key words: windscreen wiper, self-induced vibrations, simulation