

Wissenschaftliche Reihe
Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

RESEARCH

Daniel Stoll

Ein Beitrag zur Untersuchung der aerodynamischen Eigenschaften von Fahrzeugen unter böigem Seitenwind



 Springer Vieweg

The Springer Vieweg logo features a stylized chess knight icon to the left of the text 'Springer Vieweg'.

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart

Reihe 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.

Reihe 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

Daniel Stoll

Ein Beitrag zur
Untersuchung der
aerodynamischen
Eigenschaften von
Fahrzeugen unter
böigem Seitenwind

 Springer Vieweg

Daniel Stoll
Stuttgart, Deutschland

Zugl.: Dissertation Universität Stuttgart, 2017

D93

Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart
ISBN 978-3-658-21544-6 ISBN 978-3-658-21545-3 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-658-21545-3>

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, ein Teil von Springer Nature 2018

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. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Gedruckt auf säurefreiem und chlorfrei gebleichtem Papier

Springer Vieweg ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH und ist ein Teil von Springer Nature

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Abraham-Lincoln-Str. 46, 65189 Wiesbaden, Germany

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart (FKFS).

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Herrn Prof. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann, für die Übernahme des Hauptberichts. Sein großes Interesse an meiner Arbeit, die Bereitschaft, mich jederzeit bei der Lösung aller auftretenden Probleme und Fragen zu unterstützen, und die daraus entstehenden vielen interessanten Diskussionen haben zum Gelingen dieser Dissertation maßgeblich beigetragen.

Ebenso möchte ich mich bei Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Michael Hans für die Übernahme des Mitberichts und die damit verbundenen Mühen sowie seine wertvollen Anmerkungen bedanken.

Herrn Dr.-Ing. Timo Kuthada und Herrn Dipl.-Ing. Nils Widdecke möchte ich herzlichst für die Unterstützung während meiner Zeit am FKFS danken.

Bei allen Kollegen des IVK/FKFS möchte ich mich für das freundschaftliche und positive Arbeitsklima bedanken. Ihr alle habt einen wesentlichen Teil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen.

Speziell möchte ich mich auch für die Unterstützung der HIWIs und Studenten Holger Gauch, Marcel Schmolz, Sasa Milojevic und Dennis Weidner bedanken. Besonderer Dank gilt auch Herrn Korbinian Käußl vom Rennteam der Universität Stuttgart, der einen wesentlichen Beitrag bei der Fertigung der Flügel geleistet hat, und durch sein Expertenwissen im Bereich der Faserverbundwerkstoffe wesentlich zum Gelingen der Umsetzung des Systems zur Böenerzeugung im Modellwindkanal beigetragen hat.

Nicht zuletzt möchte ich mich bei meiner Familie und insbesondere bei meiner Freundin Marielle für ihren unermüdlichen Beistand und für das Korrekturlesen dieser Arbeit von Herzen bedanken.

Daniel Stoll

Inhaltsverzeichnis

Vorwort	V
Formelzeichen	XI
Abkürzungen	XV
Zusammenfassung	XVII
Abstract	XXV
1 Einleitung	1
2 Grundlagen und Stand der Technik	3
2.1 Grundlagen	3
2.1.1 Aerodynamische Beiwerte	3
2.1.2 Aerodynamische Ähnlichkeitszahlen	7
2.1.3 Statistische Beschreibung und lineare Übertragung stationärer Zufallsprozesse	8
2.1.4 Windverhältnisse und Strömungssituation auf der Straße	15
2.1.5 Reaktion eines Fahrzeugs auf Windanregung	21
2.1.6 Windkanal-Interferenzeffekte	26
2.2 Stand der Technik	39
3 Aerodynamische Entwicklungswerkzeuge	57
3.1 Der Modellwindkanal der Universität Stuttgart (MWK)	57
3.1.1 Modellwaage	60
3.1.2 Druckmesstechnik	63
3.1.3 Cobra-Sonde	64

3.2	Fahrzeugmodelle.....	65
3.2.1	SAE Referenzmodelle.....	65
3.2.2	DrivAer Modell.....	66
3.3	Numerische Strömungssimulation (CFD).....	68
3.3.1	Simulationssoftware EXA PowerFLOW®	68
3.3.2	Randbedingungen der Simulation	69
3.3.3	Digitales Modell des Modellwindkanals (DMWK)	71
3.3.4	Simulationsumgebung ohne Windkanal- Interferenzeffekte (DWT)	72
4	Auslegung eines aktiven Systems zur Böenerzeugung im Windkanal	75
4.1	Anforderungen an das Strömungsfeld.....	75
4.2	Auslegung des aktiven Systems zur Böenerzeugung.....	76
4.3	Eigenschaften des Strömungsfelds.....	80
5	Experimentelle Untersuchungen an den 20 % und 25 % SAE Modellen	85
5.1	Ergebnisse unter stationären Anströmbedingungen.....	86
5.2	Ergebnisse unter instationären Anströmbedingungen.....	88
6	Untersuchungen zum Übertragungsverhalten des Windkanalstrahls	101
6.1	Übertragungsverhalten im MWK.....	104
6.2	Übertragungsverhalten im DMWK und DWT.....	110
6.3	Untersuchungen zur Beeinflussung des Übertragungsverhaltens des Windkanalstrahls	113
6.3.1	Experimentelle Untersuchungen im MWK.....	114
6.3.2	Numerische Untersuchungen im DMWK.....	116

7	Untersuchungen am DrivAer Stufenheckmodell in unterschiedlichen Versuchsumgebungen	121
7.1	Ergebnisse unter stationären Anströmbedingungen.....	122
7.2	Ergebnisse unter instationären Anströmbedingungen.....	124
7.3	Übertragbarkeit zwischen dem 20 % und 25 % Modellmaßstab.....	129
7.4	Beeinflussung der Fahrzeugreaktion durch aerodynamische Maßnahmen	133
7.4.1	Untersuchungen im MWK und DWT	134
7.4.2	Numerische Untersuchungen im DWT	138
8	Schlussfolgerungen und Ausblick	143
	Literaturverzeichnis	149
	Anhang	159
A.1	Optimiertes Flügelprofil.....	159
A.2	Übertragungsverhalten des 20 % SAE Stufenheckmodells für verschiedene Anströmbedingungen	160
A.3	Übertragungsverhalten auf den Seitenflächen des SAE Vollheckmodells	161
A.4	Übertragungsverhalten des DrivAer Vollheckmodells	162
A.5	Druckmessstellen auf den SAE Referenzmodellen.....	163

Formelzeichen

A_x	m^2	Stirnfläche in x-Richtung
A_N	m^2	Düsenfläche
c	m/s	Schallgeschwindigkeit
c_A	-	Auftriebsbeiwert
c_{Ah}	-	Auftriebsbeiwert an der Hinterachse
c_{Av}	-	Auftriebsbeiwert an der Vorderachse
c_L	-	Rollmomentbeiwert
c_M	-	Nickmomentbeiwert
c_N	-	Giermomentbeiwert
c_p	-	Druckbeiwert
$c_{p,rms}$	%	Druckschwankungskoeffizient
c_S	-	Seitenkraftbeiwert
c_{Sh}	-	Seitenkraftbeiwert an der Hinterachse
c_{Sv}	-	Seitenkraftbeiwert an der Vorderachse
c_W	-	Luftwiderstandsbeiwert
d	m	Abstand zwischen benachbarten Flügelpaaren
d_h	m	hydraulischer Düsendurchmesser
$dc/d\beta$	1°	stationärer Gradient
f	Hz	Frequenz
f_E	Hz	Frequenz der Edgetone-Rückkopplung
f_{HR}	Hz	Plenum-Helmholtz-Resonanz
f_R	Hz	Rohrresonanz der Windkanalröhre
f_S	Hz	Abtastfrequenz
f_W	Hz	Wirbelablösefrequenz

f_n	Hz	Eigenfrequenz der Raummoden
F_A	N	Auftriebskraft
F_S	N	Seitenkraft
F_T	N	Tangentialkraft
F_W	N	Luftwiderstandskraft
$H_a(f)$	1/°	aerodynamische Übertragungsfunktion
$H_{\alpha\beta}(f)$	-	Übertragungsfunktion zwischen Flügelwinkel α und Strömungswinkel β
T_f	s	Fensterlänge der FFT, Zeitfenster
Tu_i	%	Turbulenzgrad ($i = u, v, w$)
l_{Fzg}	m	Fahrzeuglänge
$l_{x,y,z}$	m	Abmessungen des Plenums
l_0	m	Radstand
l_c	m	Profilschneidlänge
l_{HR}	m	Länge der Luftsäule des Helmholtz-Resonators
l_{TS}	m	Länge der Messstrecke
L_i	m	integrales Längenmaß ($i = u, v, w$)
$m_{x,y,z}$	-	Ordnung der Raummoden im Plenum
m_E	-	Ordnung der Edgetone-Mode
m_R	-	Ordnung der Rohrmode
M_x	Nm	Rollmoment
M_y	Nm	Nickmoment
M_z	Nm	Giermoment
p	Pa	Druck
p_∞	Pa	Druck der ungestörten Anströmung
q_∞	Pa	dynamischer Druck, Staudruck
r_{HR}	m	Radius des Resonatorhalses
Re	-	Reynoldszahl

R_{con}	-	Konvektionsrate
$R_{xx}(\tau)$		Autokorrelationsfunktion
$R_{xy}(\tau)$		Kreuzkorrelationsfunktion
s	m	Spurbreite
St	-	Strouhalzahl
$S_{ii}(f)$		Autoleistungsdichtespektren der Geschwindigkeitskomponenten in Koordinatenrichtungen ($i = u, v, w$)
$S_{xx}(f)$		Autoleistungsdichtespektrum
$S_{c_s, c_N}(f)$		Autoleistungsdichtespektrum des Seitenkraftbeiwerts bzw. Giermomentbeiwerts
$S_{\alpha}(f)$		Autoleistungsdichtespektrum des Flügelwinkels
$S_{\beta}(f)$		Autoleistungsdichtespektrum der Windanregung bzw. des Strömungswinkels
$S_{xy}(f)$		Kreuzleistungsdichtespektrum
$S_{\alpha\beta}(f)$		Kreuzleistungsdichtespektrum zwischen Flügelwinkel und Strömungswinkel
$S_{\beta c_s, N}(f)$		Kreuzleistungsdichtespektrum zwischen Windanregung und Seitenkraft- bzw. Giermomentbeiwert
t	s	Zeit
u, v, w	m/s	Geschwindigkeitskomponenten in Koordinatenrichtungen
U_N	m	Umfang der Düse
v_{Fzg}	m/s	Fahrzeuggeschwindigkeit
v_{Wind}	m/s	Windgeschwindigkeit
v_{∞}	m/s	Anströmgeschwindigkeit
v_{θ}	m/s	Phasengeschwindigkeit
V_P	m ³	Volumen des Plenums
x_d	m	Abstand zur Düsenaustrittsebene
x_s	m	Abstand zur Drehachse der Flügel
$X_a(f)$	-	Aerodynamische Admittanz

α	°	Anstellwinkel, Flügelwinkel
β	°	horizontaler Strömungswinkel, Anströmwinkel bzgl. der Fahrzeuglängsachse
$\gamma_{xy}^2(f)$	-	Kohärenz
$\gamma_{\alpha\beta}^2(f)$	-	Kohärenz zwischen Flügelwinkel und Strömungswinkel
$\gamma_{\beta S,N}^2(f)$	-	Kohärenz zwischen Windanregung und resultierender Seitenkraft bzw. Giermoment
ν	m ² /s	kinematische Viskosität
$\theta_{xy}(f)$	°	Phasenwinkel
ρ	kg/m ³	Luftdichte
σ		Standardabweichung
σ^2		Varianz
τ	s	Zeitverschiebung
φ	°	Windwinkel
φ_{ii}	-	Korrelationskoeffizient ($i = u, v, w$)

Abkürzungen

CAD	Computer Aided Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
DMWK	Digitales Modell des Modellwindkanals
DWT	Digitaler Windkanal, Box ohne Interferenzeffekte
ESDU	Engineering Sciences Data Unit
EXA	EXA Corporation
FFT	Fast Fourier Transformation
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart
FKFS <i>swing</i> [®]	<u>S</u> ide <u>W</u> ind <u>G</u> enerator
IVK	Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen
KBS	Konventionelle Bodensimulation
Kfz	Kraftfahrzeug
MWK	Modellwindkanal
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
NI	National Instruments
OASPL	Overall Sound Pressure Level
Pkw	Personenkraftwagen
RMS	Root Mean Square
RSO	Road Side Obstacles
SAE	Society of Automotive Engineers
SFS	Straßenfahrtsimulation
TFI	Turbulent Flow Instrumentation
TGS	Turbulence Generation System
VR	Variable Resolution

Zusammenfassung

Die aerodynamische Fahrzeugentwicklung erfolgt heute üblicherweise im Windkanal unter konstanten, gleichförmigen und turbulenzarmen Anströmbedingungen. Dabei gewinnt neben dem Windkanalversuch auch die numerische Strömungssimulation CFD (Computational Fluid Dynamics) zunehmend an Bedeutung. Windkanal und CFD ergänzen einander und helfen – schon in einem frühen Stadium der Fahrzeugentwicklung – grundlegende Strömungsphänomene besser zu verstehen und zu durchdringen.

Zur Beurteilung der Seitenwindempfindlichkeit eines Fahrzeugs wird dieses sowohl im Windkanal als auch in der CFD relativ zur turbulenzarmen Anströmung gedreht, um so einen stationären Anströmwinkel zu realisieren. Die zur Beurteilung herangezogenen Kräfte werden über einen bestimmten Zeitraum gemessen und gemittelt. Nicht berücksichtigt werden die Böigkeit des natürlichen Winds und die – auch schon bei stationärer Anströmung durch Ablösung am Heck – entstehenden instationären Kräfte und Momente. Nach dem Stand der Technik ist allerdings davon auszugehen, dass die üblicherweise verwendete quasi-stationäre Betrachtung, die von einer frequenzunabhängigen Abhängigkeit zwischen Windanregung und Kräften ausgeht, zur Beschreibung des instationären Verhaltens im für die Fahrdynamik relevanten Frequenzbereich nicht ausreicht.

Um die Nachteile des stationären Ansatzes im Windkanal zu umgehen und eine Quantifizierung des instationären Verhaltens eines Fahrzeugs unter böigem Seitenwind zu ermöglichen, wurde von Schröck [1] am IVK/FKFS eine Methode zur Beurteilung der instationären Fahrzeugreaktion unter böigem Seitenwind entwickelt. Diese Methode beinhaltet die Reproduktion der Böigkeit des natürlichen Winds im Windkanal sowie die Ermittlung der am Fahrzeug resultierenden Kräfte und Momente. Dabei wird die instationäre aerodynamische Reaktion des Fahrzeugs auf Seitenwindanregung im systemtheoretischen Sinne als Ein-/ Ausgangssystem beschrieben. Im Unterschied zu dem üblicherweise verwendeten quasi-stationären Ansatz wird ein kausa-

ler Zusammenhang zwischen Windanregung und Reaktion hergestellt, der mit Hilfe der Kohärenz auf seine Gültigkeit überprüft werden kann. Die Beschreibung der Modellreaktion erfolgt über die aerodynamische Admittanz und die aerodynamische Übertragungsfunktion.

In der vorliegenden Arbeit werden, aufbauend auf der von Schröck entwickelten Methode, die aerodynamischen Eigenschaften von Fahrzeugen unter böigem Seitenwind sowie der Einfluss der Windkanalumgebung auf die ermittelten instationären Kräfte und Momente anhand experimenteller und korrespondierender, numerischer Methoden untersucht.

Zur Darstellung der wesentlichen Eigenschaften von starkem böigem Seitenwind in der Messstrecke des Modellwindkanals der Universität Stuttgart (MWK) wurde ein aktives System zur Böenerzeugung entwickelt, mit dem der Windkanalstrahl gezielt seitlich ausgelenkt werden kann. Die Strömungsauslenkung erfolgt dynamisch durch sechs vertikal am Düsenaustritt angeordnete Flügelprofile. Das erzeugte Strömungsfeld beinhaltet die für die Fahrdynamik relevanten auf der Straße bei starkem böigem Wind vorherrschenden Eigenschaften. Kleinskalige turbulente Strukturen und vertikale Komponenten werden nicht reproduziert. In einer Ebene direkt hinter den Flügeln wird ein quer zur Hauptströmungsrichtung kohärentes Strömungsfeld erzeugt, das durch einen einzigen Messpunkt beschrieben werden kann. Es wird daher davon ausgegangen, dass das gesamte Strömungsfeld durch einen einzigen Systemeingang abgebildet werden kann und ein einziger Messpunkt vor dem Fahrzeug ausreicht, um die Windanregung zu beschreiben. Die im Folgenden dargestellten Ergebnisse werden jedoch zeigen, dass dieser Ansatz in einem Windkanal mit offener Messstrecke nicht angewendet werden kann.

Entsprechend der experimentellen Versuchsumgebung des MWK wurde ein digitales Simulationsmodell des Modellwindkanals (DMWK) aufgebaut. Dieses Modell beinhaltet die komplette Windkanalgeometrie von der Düsenvorkammer bis zum Diffusor. Zur dynamischen Strömungsauslenkung wird das aktive System zur Böenerzeugung abgebildet. Außerdem wurde eine Simulationsumgebung ohne Windkanal-Interferenzeffekte (DWT, Digital

Wind Tunnel) vorgestellt, die eine Untersuchung des Fahrzeugverhaltens ohne die in einem Windkanal mit offener Messstrecke bekannten Interferenzeffekte ermöglicht.

Um ein grundsätzliches Verständnis über die Auswirkungen des gewählten Ansatzes auf die aerodynamischen Eigenschaften unterschiedlicher Modellmaßstäbe und Fahrzeugformen zu bekommen, wurden das SAE Stufen- und Vollheckmodell jeweils im 20 % und 25 % Maßstab im MWK untersucht und miteinander verglichen. Der Vergleich unter stationären Anströmbedingungen hat gezeigt, dass eine gute Übertragbarkeit der aerodynamischen Fahrzeugeigenschaften zwischen den untersuchten Modellmaßstäben gegeben ist. Das Fahrzeugverhalten unter stationären Anströmbedingungen ist für das jeweilige Stufen- und Vollheckmodell nahezu identisch. Beim Stufenheckmodell nimmt im Vergleich zum Vollheckmodell der stationäre Gradient der Seitenkraft deutlich kleinere, und der stationäre Gradient des Giermoments deutlich größere Werte an. Die Überprüfung der Kausalität zwischen Windanregung und Modellreaktion mit der Kohärenzfunktion zeigt, dass unter instationären Anströmbedingungen ein eindeutiger Zusammenhang zwischen der an einem Punkt vor dem Fahrzeug erfassten Windanregung und der resultierenden Modellreaktion besteht. Dies lässt den Schluss zu, dass die Fahrzeugreaktion der an dem Messpunkt vor dem Fahrzeug erfassten Windanregung zuzuschreiben ist und sowohl die Admittanz wie auch die Übertragungsfunktion zur Beschreibung der instationären aerodynamischen Fahrzeugeigenschaften herangezogen werden kann. Anders als zu erwarten, ist jedoch eine vom Maßstab abhängige Überhöhung der instationären Kräfte und Momente zu beobachten. Außerdem verschiebt sich das Maximum der Überhöhung beim größeren Modellmaßstab zu einer höheren dimensionslosen Frequenz. Dabei zeigt vor allem die Amplitude des Giermoments bei den 25 % Modellen eine stärker ausgeprägte Überhöhung als dies bei den entsprechenden 20 % Modellen der Fall ist. Das instationäre Giermoment der Vollheckmodelle ist dabei größer als das der im Maßstab identischen Stufenheckmodelle. Die Analyse der Druckverteilung auf den Seitenflächen zeigt, dass der gefundene Einfluss vor allem im hinteren Bereich der Modelle festzustellen ist. Beim größeren Modell resultieren hier

größere Druckamplituden sowie ein zeitlicher Bezug der in einem deutlich stärkeren Anstieg des Giermoments resultiert. Dieses Verhalten ist auf eine Veränderung des Strömungsfelds entlang der Fahrzeuglängsachse zurückzuführen. Die an einem Punkt vor dem Fahrzeug erfasste Eingangsgröße enthält die komplette Information der Anregung, die resultierende Fahrzeugreaktion ist aber nicht ausschließlich auf das aerodynamische Übertragungsverhalten des Fahrzeugs zurückzuführen. Das mit dem gewählten Ansatz ermittelte aerodynamische Übertragungsverhalten ist von einem zusätzlichen von der Fahrzeugumströmung unabhängigen Übertragungsverhalten überlagert.

Um den nicht von der Fahrzeugform stammenden Einfluss auf das ermittelte Übertragungsverhalten zu beschreiben, wird ein Ansatz vorgestellt, der den Windkanalstrahl mit Methoden der linearen, zeitinvarianten Systemtheorie beschreibt. Dazu wird die Windanregung und die Reaktion des Strömungsfelds in der leeren Messstrecke des Windkanals durch eine Ein-/ Ausgangsbeziehung verknüpft. Der Flügelwinkel des aktiven Systems zur Böenerzeugung wird als die Eingangsgröße und der resultierende Strömungswinkel in der leeren Messstrecke als die Ausgangsgröße zur Bestimmung des Systemverhaltens herangezogen. Dies ermöglicht eine Beschreibung der instationären Eigenschaften des Windkanalstrahls und stellt eine entscheidende Erweiterung zu den aus dem Stand der Technik bekannten Methoden zur Beschreibung der instationären Eigenschaften des Strömungsfelds dar. Um die räumlichen Eigenschaften des Windkanalstrahls zu quantifizieren, wurden Messungen an repräsentativen Positionen in der leeren Messstrecke des Modellwindkanals durchgeführt. Dadurch konnte gezeigt werden, dass der Windkanalstrahl selbst ein dynamisches Verhalten aufweist, das mit Hilfe der Übertragungsfunktion zwischen dem Flügelwinkel des dynamischen Systems zur Strömungsauslenkung und dem im der leeren Messstrecke resultierenden Strömungswinkel beschrieben werden kann. Dieses Verhalten ist auf die bei dynamischer Auslenkung des Windkanalstrahls verursachte Anfachung der Kelvin-Helmholtz-Instabilität in der Scherschicht zurückzuführen. Die sich in der Scherschicht ausbildenden großskaligen Wirbelstrukturen erzeugen im Strahlkern eine Querkomponente, die abhängig von der Frequenz

zu einer Überhöhung oder Dämpfung des resultierenden Strömungswinkels sowie zu einer zeitlichen Verzögerung der Ausbreitungsgeschwindigkeit der erzeugten Wellen führt. Im relevanten Frequenzbereich ist eine mit zunehmendem Abstand zur Düse stark ausgeprägte Überhöhung der resultierenden Amplitude des Strömungswinkels festzustellen. In der numerischen Versuchsumgebung des DMWK konnte ein entsprechendes Verhalten bestimmt werden.

Um den Einfluss der in einem Windkanal vorhandenen geometrischen Randbedingungen auf das Übertragungsverhalten des Windkanalstrahls zu untersuchen, wurden sowohl Windkanalversuche als auch CFD-Simulationen mit unterschiedlichen geometrischen Randbedingungen durchgeführt. Durch die gezielte Veränderung geometrischer Parameter konnte ausgeschlossen werden, dass die Messergebnisse durch die in einem Windkanal mit offener Messstrecke und geschlossener Luftrückführung bekannten Resonanzphänomene verfälscht werden. Das Übertragungsverhalten ist demnach ausschließlich auf die in der Scherschicht vorherrschenden Wirbelstrukturen zurückzuführen. In der numerischen Versuchsumgebung des DWT hingegen ist dieses Verhalten nicht zu beobachten. Die vorgegebenen Strömungswinkel breiten sich ohne jegliche zeitliche Verzögerung oder räumliche Anfachung oder Abschwächung aus. Dies entspricht in guter Näherung einem unendlich ausgedehnten Strömungsfeld und ermöglicht deshalb die Untersuchung des aerodynamischen Übertragungsverhaltens eines Fahrzeugs ohne Einflüsse, die nicht dem Fahrzeug selbst zuzuschreiben sind.

Mit den vorgestellten Versuchsumgebungen wurde das instationäre aerodynamische Übertragungsverhalten des DrivAer Stufenheckmodells untersucht. Zunächst wurde das 25 % Stufenheckmodell unter stationären Anströmbedingungen in den einzelnen Versuchsumgebungen betrachtet. Die aus den stationären Gierwinkelreihen ermittelten Gradienten der Seitenkraft und des Giermoments sind in guter Übereinstimmung. Ausgehend von der Analyse unter stationären Bedingungen, wurde das instationäre aerodynamische Übertragungsverhalten unter Windanregung in den betrachteten Versuchsumgebungen untersucht. Die ermittelten instationären aerodynamischen Fahrzeugeigenschaften der DMWK-Simulation sind in guter Übereinstim-

mung mit dem Experiment. Die Übertragungsfunktion der Seitenkraft und des Giermoments der DWT-Simulation zeigt ein anderes Übertragungsverhalten. Im Vergleich zu den Ergebnissen des MWK und DMWK kann im DWT keine Überhöhung der instationären Seitenkraft gegenüber dem Stationärwert festgestellt werden. Das instationäre Giermoment im MWK und DMWK zeigt eine relative Überhöhung des Giermoments von 60 % gegenüber dem Stationärwert. Das instationäre Giermoment der DWT-Simulation hingegen zeigt eine Überhöhung des instationären Giermoments von bis zu 70 % gegenüber dem Stationärwert. Im DWT tritt die Überhöhung zudem in einem Frequenzbereich auf, der für die Regeltätigkeit des Fahrers besonders relevant ist und damit sein Komfort- und Sicherheitsempfinden beeinflusst. Das Übertragungsverhalten des Windkanalstrahls führt zu einer Fahrzeugreaktion, die sich von der in einem Freifeld zu erwartenden unterscheidet. Die Ergebnisse zeigen auch, dass in der Versuchsumgebung des DWT – im Gegensatz zur Versuchsumgebung des MWK und DMWK – eine quasi identische Übertragbarkeit der instationären aerodynamischen Fahrzeugeigenschaften zwischen den betrachteten Modellmaßstäben (20 % und 25 %) gegeben ist.

Außerdem wurde untersucht, ob unter dem Einfluss des Übertragungsverhaltens des Windkanalstrahls aerodynamische Maßnahmen, die die Fahrzeugeigenschaften günstig beeinflussen – das heißt insbesondere das Giermoment reduzieren – abgeleitet werden können. Dazu wurden aerodynamische Maßnahmen zur gezielten Beeinflussung der aerodynamischen Fahrzeugeigenschaften vorgestellt. Es konnte gezeigt werden, dass aerodynamische Maßnahmen existieren, die bei einer rein stationären Betrachtung das Giermoment reduzieren, jedoch deutlich unterschiedliche Amplituden des instationären Giermoments – im in einem für das System Fahrer-Fahrzeug relevanten Frequenzbereich – aufweisen. Zum einen ist die Beschreibung der Wirkungsweise dieser aerodynamischen Maßnahmen unter stationären Bedingungen falsch, ihr Potential kann nur im Frequenzbereich quantifiziert werden. Zum anderen fällt die Wirksamkeit je nach Versuchsumgebung anders aus. Im Vergleich zum Ausgangsmodell konnte das instationäre Giermoment – in der Versuchsumgebung des DWT – durch Abrisskanten am Heck des Stufen-