

# TECHNISCHE UNIVERSITÄT MÜNCHEN

Lehrstuhl für Numerische Mechanik

## Einfluss instationärer aerodynamischer Kräfte auf die Fahrdynamik von Personenkraftwagen

Dipl.-Ing. Univ. Jakob Huemer

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp

Prüfer der Dissertation:

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang A. Wall
2. Hon.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Hans-Hermann Braess

Die Dissertation wurde am 17. Dezember 2013 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 2. Oktober 2014 angenommen.



## Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Promotionstätigkeit bei der BMW Group im Fachbereich Entwicklung Fahrdynamik.

Bei Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang A. Wall bedanke ich mich sehr herzlich für das entgegengebrachte Interesse an der Dynamik von Kraftfahrzeugen und den Zusammenhängen in der Interaktion Aerodynamik und Fahrdynamik, für die Unterstützung bei der Entstehung der Arbeit sowie für die Übernahme des Hauptreferates. Herrn Hon.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. H.-H. Braess möchte ich sehr herzlich für die äußerst konstruktiven Anmerkungen sowie die Übernahme des Koreferates danken. Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Markus Lienkamp möchte ich für den Vorsitz des Prüfungsausschusses danken.

Seitens der BMW Group danke ich vor allem Herrn Thomas Stickel für die umfangreiche Betreuung meiner Promotionstätigkeit und die Weitergabe seiner umfassenden, langjährigen Expertise im Bereich des Zusammenspiels von Aerodynamik und Fahrdynamik. Herrn Dr.-Ing. Erich Sagan danke ich sehr für die mir entgegengebrachte Unterstützung und den diversen, äußerst lehrreichen Diskussionen zur Dynamik von Personenkraftwagen. Den Herren Martin Schwarz und Reinhard Mühlbauer danke ich sehr für das Ermöglichen dieser Arbeit. Herrn Johann Mitterer und Herrn Dr.-Ing. Jürgen Guldner danke ich für die Übernahme der Schirmherrschaft des Projektes Interaktion Aerodynamik & Fahrdynamik im Rahmen der CAR@TUM-Kooperation mit der Technischen Universität München. Zudem danke ich der Abteilung Funktionale Grundauslegung, Analyse insbesondere der Gruppe Objektivierung Fahrdynamik sowie der Gruppe Mobile Messtechnik für deren konstruktive Unterstützung und erlebte Begeisterungsfähigkeit für Fragestellungen der Fahrzeugdynamik und des Seitenwindverhaltens.

Darüber hinaus möchte ich Herrn Dr.-Ing. Dominik Mäder, Herrn Dr.-Ing. Christian Wimmer, Herrn Dr.-Ing. Karsten Röske und Herrn Florian Niedermeier für die interessanten Diskussionen bzgl. diverser Themen der Fahrzeugdynamik danken. Herrn Dr.-Ing. Pascal Theissen, Herrn Dr.-Ing. Johannes Wojciak und Herrn Dr.-Ing. Rainer Demuth danke ich für den sehr konstruktiven Austausch zu Themen der instationären Aerodynamik.

Mein besonderer Dank gilt auch den Herren Andreas Fischer, Ronny Hess, Hubert Scholz und Phillip Trautvetter, die im Rahmen Ihrer Studienabschlussarbeiten weitere Erkenntnisse für das Gelingen der vorliegenden Arbeit ermöglichten.

Meiner Familie danke ich sehr für die mir entgegengebrachte Unterstützung bei der Erstellung dieser Arbeit.

Jakob Huemer, München, 12. November 2014

# Inhaltsverzeichnis

<b>Formelzeichen und Abkürzungen</b>	<b>iv</b>
<b>Kurzfassung</b>	<b>ix</b>
<b>1. Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2. Stand der Technik und Zielsetzung</b>	<b>3</b>
2.1. Phänomene des Seitenwindverhaltens . . . . .	3
2.2. Aerodynamische Anregung . . . . .	5
2.2.1. Aerodynamische Anströmung . . . . .	5
2.2.2. Aerodynamische Kräfte und Momente . . . . .	8
2.3. Fahrzeugreaktion bei Seitenwind . . . . .	14
2.3.1. Berechnung der Fahrzeugreaktion . . . . .	14
2.3.2. Einfluss von Fahrzeug- und Fahrwerkparameter . . . . .	23
2.3.3. Einfluss aktiver, mechatronischer Systeme . . . . .	25
2.3.4. Einfluss des Fahrers . . . . .	26
2.4. Fahrversuch zur Beurteilung des Seitenwindverhaltens . . . . .	27
2.4.1. Erprobung Seitenwindverhalten im Realversuch . . . . .	27
2.4.2. Erprobung Seitenwindverhalten an einer Seitenwindanlage . . . . .	28
2.5. Objektivierung der Subjektivwahrnehmung der Seitenwindreaktion . . . . .	29
2.5.1. Wahrnehmungsschwellen der Fahrzeugbewegung . . . . .	29
2.5.2. Charakteristische Kenngrößen der Fahrzeugantwort . . . . .	32
2.6. Zielsetzung . . . . .	35
<b>3. Definition relevanter aerodynamischer Anregungen</b>	<b>37</b>
3.1. Arten der aerodynamischen Anregung . . . . .	38
3.2. Variation der aerodynamischen Anregung . . . . .	40
<b>4. Simulation der Fahrzeugantwort</b>	<b>43</b>
4.1. Untersuchte Fahrzeug- und Fahrwerkstypen . . . . .	43
4.2. Zweispurmodellierung in ISAR . . . . .	45
4.3. Mehrkörpersimulation in ADAMS . . . . .	45
4.4. Validierung der Fahrdynamiksimulation . . . . .	46
4.4.1. Fahrzeugantwort bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage . . . . .	46
4.4.2. Fahrzeugantwort bei Anregung mit kleinen Querkräften . . . . .	50
4.5. Simulationsergebnisse der Fahrzeugreaktion bei aerodynamischer Anregung . .	57
4.5.1. Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage . . . . .	57
4.5.2. Generische Seitenwindböe . . . . .	59

4.5.3. Generische Seitenwindböe bei konstanter Anströmung . . . . .	60
4.6. Bewertung der Simulationsergebnisse . . . . .	61
<b>5. Einfluss instationärer Kenngrößen auf die Fahrzeugreaktion</b>	<b>65</b>
5.1. Abhängigkeit der Fahrzeugreaktion von der Amplitudenzusammensetzung . . .	66
5.1.1. Einfluss einzelner Amplitudenänderungen . . . . .	66
5.1.2. Einfluss kombinierter Amplitudenänderungen . . . . .	69
5.2. Abhängigkeit von der zeitlichen Zusammensetzung . . . . .	76
5.2.1. Einfluss von Zeitverzügen der Anregungsgrößen . . . . .	78
5.2.2. Fahrzeugabhängigkeit des Einflusses von Zeitverzügen . . . . .	84
5.3. Einfluss einer kombinierten Anregungsänderungen . . . . .	86
<b>6. Einfluss des Fahrwerks auf die Fahrzeugreaktion</b>	<b>91</b>
6.1. Beschreibung der Analysemethodik . . . . .	92
6.1.1. Berechnung der Einflussgröße der Fahrzeugparameter . . . . .	92
6.1.2. Graphische Darstellung der Einflussgröße . . . . .	94
6.2. Ergebnisse der Stellhebelanalyse der Fahrzeugparameter . . . . .	95
6.2.1. Einfluss von Parameteränderungen gleicher Größenordnung . . . . .	96
6.2.2. Stellhebelanalyse mit Betrachtung einer Variationsbreite der Parameter	104
6.3. Einfluss ausgewählter Fahrwerksbauteile auf die Fahrzeugreaktion . . . . .	107
6.3.1. Gummi- und Hydrolager . . . . .	107
6.3.2. Einfluss des Fahrzeugreifens . . . . .	109
<b>7. Objektivierung der subjektiven Fahrerwahrnehmung</b>	<b>117</b>
7.1. Beschreibung des Versuchsaufbaus . . . . .	118
7.2. Durchführung einer Probandenstudie . . . . .	119
7.2.1. Versuchsreihen und Manörovorgaben . . . . .	119
7.2.2. Bewertung der Fahrzeugbewegung durch die Probanden . . . . .	122
7.3. Auswertung der Probandenstudie . . . . .	123
7.3.1. Bewertung einer Änderung einzelner Bewegungsgrößen . . . . .	124
7.3.2. Absolute Bewertung allgemeiner Fahrzeugreaktion . . . . .	128
<b>8. Empfehlung zur Grundausslegung des Seitenwindverhaltens</b>	<b>133</b>
<b>9. Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>135</b>
<b>A. Anhang</b>	<b>139</b>
A.1. Signalanalyse . . . . .	139
A.2. Stochastik . . . . .	140
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>143</b>

# Formelzeichen und Abkürzungen

## Allgemeine Schreibweise

$v$	Skalar
$\boldsymbol{v}$	Vektor
$\bar{x}$	arithmetisches Mittel

## Lateinische Formelzeichen

$a_x$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Fahrzeuglängsbeschleunigung
$a_y$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Fahrzeugquerbeschleunigung
$a_{y,A}$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Querbeschleunigung Fahrzeugaufbau
$a_{y,K}$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Querbeschleunigung Position Kopf des Fahrers
$a_z$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Fahrzeugvertikalbeschleunigung
$C_x$	$[-]$	aerodyn. Kraftbeiwert in Richtung Fahrzeuglängsachse
$C_y$	$[-]$	aerodyn. Kraftbeiwert in Richtung Fahrzeugquerachse
$C_z$	$[-]$	aerodyn. Kraftbeiwert in Richtung Fahrzeughochachse
$C_{z1}$	$[-]$	aerodyn. Auftriebsbeiwert an der Vorderachse
$C_{z2}$	$[-]$	aerodyn. Auftriebsbeiwert an der Hinterachse
$C_{Mx}$	$[-]$	aerodyn. Momentenbeiwert um die Fahrzeuglängsachse
$C_{My}$	$[-]$	aerodyn. Momentenbeiwert um die Fahrzeugquerachse
$C_{Mz}$	$[-]$	aerodyn. Momentenbeiwert um die Fahrzeughochachse
$C_{\alpha i}$	$[-]$	Schräglaufsteifigkeit des Reifens an der Vorder-/Hinterachse
$d_{sp,pnl}$	$[m]$	Abstand Schwerpunkt zu Punkt-Neutralen-Lenkens
$e_{ar,dp}$	$[m]$	Abstand aerodyn. Referenzpunkt zu aerodyn. Druckpunkt
$e_{sp,dp}$	$[m]$	horizontaler Abstand Schwerpunkt zu aerodyn. Druckpunkt
$f_P$	$[U/s]$	Drehzahl des Antriebs eines Massependels
$g$	$\left[\frac{m}{s^2}\right]$	Erdbeschleunigung
$h_{asp}$	$[m]$	Höhe Schwerpunkt des Fahrzeugaufbaus
$h_{sp}$	$[m]$	Höhe Fahrzeugschwerpunkt
$h_{wa,i}$	$[m]$	Höhe der Fahrzeugwankachse an Vorder-/Hinterachse
$h_{wa,asp}$	$[m]$	Höhe Aufbauswerpunkt bis Fahrzeugwankachse
$l_{1/2}$	$[m]$	Schenkellänge des Kurbeltriebs eines Massenpendels
$l_f$	$[m]$	Länge Gesamtfahrzeug
$l_h$	$[m]$	Abstand Gesamtschwerpunkt zu Hinterachse
$l_r$	$[m]$	Radstand
$l_s$	$[m]$	Spurweite
$l_v$	$[m]$	Abstand Gesamtschwerpunkt zu Vorderachse

$m$	$[-]$	Anzahl Probanden
$m_A$	$[kg]$	Masse Fahrzeugaufbau
$m_{Fzg}$	$[kg]$	Masse Gesamtfahrzeug
$m_{h/v}$	$[-]$	Achslastverteilung Hinterachse zu Vorderachse
$m_P$	$[kg]$	Pendelmasse
$n$	$[-]$	Stichprobenumfang
$n_j$	$[-]$	Bewertungsfaktor charakt. Größe der Fahrzeugbewegung
$n_{R,i}$	$[m]$	Reifennachlaufstrecke
$p_L$	$[hPa]$	Luftdruck
$p_{R,i}$	$[bar]$	Fülldruck Reifen Vorder-/Hinterachse
$p_x$	$[m]$	Position des Fahrzeugs in der Ebene in x-Richtung
$p_y$	$[m]$	Position des Fahrzeugs im der Ebene in y-Richtung
$r_K$	$[m]$	Krümmungsradius der Bahnkurve
$r_{XY}$	$[-]$	Pearson Korrelation
$s$	$[-]$	Laplace-Operator
$t$	$[s]$	Zeit
$t_q$	$[s]$	Zeitpunkt zur Bewertung des Querversatzes
$v_{Fzg}$	$\left[\frac{km}{h}\right]$	Fahrzeuggeschwindigkeit
$v_i$	$\left[\frac{km}{h}\right]$	Fahrzeuggeschwindigkeit an Vorder-/Hinterachse
$v_{Res}$	$\left[\frac{km}{h}\right]$	Resultierende Anströmgeschwindigkeit
$\bar{v}_{SWA}$	$\left[\frac{km}{h}\right]$	Mittelere Strömungsgeschwindigkeit Seitenwindanlage
$v_{Wind}$	$\left[\frac{km}{h}\right]$	Windgeschwindigkeit
$z_{R,ij}$	$[m]$	Position der Räder in vertikaler Richtung
$A_R$	$[m^2]$	Regelfläche der Fahrzeugquerabweichung
$A_q$	$[m^2]$	Querspanfläche des Fahrzeugs
$B$	$[Bft]$	Windstärke entsprechend Beaufort-Skala
$C_\varphi$	$\left[\frac{Nm}{\circ}\right]$	Gesamtdrehfederkonstante Wanksteifigkeit
$D_\varphi$	$[Nm \cdot s]$	Gesamtdämpfungs-konstante Wankdämpfung
$D_f$	$[Nm \cdot s]$	Dämpfungsmaß Gierbewegung fixed control
$F_{x,i}$	$[N]$	Längskraft Reifen Vorder-/Hinterachse
$F_{y,i}$	$[N]$	Querkraft Reifen Vorder-/Hinterachse
$F_{y,j}$	$[N]$	Querkraft Reifen links, rechts
$F_{z,j}$	$[N]$	Vertikalkraft Reifen links, rechts
$F_x$	$[N]$	Kraft in Richtung Fahrzeuglängsachse
$F_y$	$[N]$	Kraft in Richtung Fahrzeugquerachse
$F_z$	$[N]$	Kraft in Richtung Fahrzeughochachse
$F_{z1}$	$[N]$	aerodyn. Auftriebskraft Vorderachse
$F_{z2}$	$[N]$	aerodyn. Auftriebskraft Hinterachse
$I_{xx}$	$[kgm^2]$	Trägheitsmoment um die Fahrzeuglängsachse
$I_{xx,A}$	$[kgm^2]$	Trägheitsmoment Aufbau um die Fahrzeuglängsachse
$I_{yy}$	$[kgm^2]$	Trägheitsmoment um die Fahrzeugquerachse
$I_{zz}$	$[kgm^2]$	Trägheitsmoment um die Fahrzeughochachse
$M_R$	$[-]$	Übertragungsfunktion des Fahrers als Querführungsregler
$M_L$	$[Nm]$	Lenkmoment

## Formelzeichen und Abkürzungen

---

$M_x$	$[Nm]$	Moment um die Fahrzeuglängsachse
$M_y$	$[Nm]$	Moment um die Fahrzeugquerachse
$M_z$	$[Nm]$	Moment um die Fahrzeughochachse
$P$	$[-]$	Konfidenzniveau
$T_0$	$[s]$	Totzeit des Reglers
$T_{eq}$	$[s]$	äquivalente Verzögerungszeit
$T_D$	$[s]$	Vorhaltkonstante
$T_I$	$[s]$	Verzögerungskonstante
$T_L$	$[^{\circ}C]$	Lufttemperatur
$T_P$	$[s]$	Vorrausschauzeit
$T_v$	$[s]$	Betrachtungszeit Vibration
$V_M$	$[-]$	Verstärkungsfaktor Lenkradwinkeleingabe Fahrer

## Griechische Formelzeichen

$\alpha$	$[-]$	Signifikanzniveau
$\alpha_i$	$[^{\circ}]$	Schräglaufwinkel an Vorder-/Hinterachse
$\beta$	$[^{\circ}]$	Schwimmwinkel bezogen auf den Fahrzeugschwerpunkt
$\beta_0$	$[^{\circ}]$	konstanter Schwimmwinkel des Fahrzeugs
$\beta_x$	$[-]$	Regressionskoeffizient einer Messreihe x
$\delta_L$	$[^{\circ}]$	Lenkradwinkel
$\delta_v$	$[^{\circ}]$	Einschlagwinkel Vorderrad
$\epsilon$	$[\%]$	Variation Fahrzeug- und Fahrwerksparameter
$\eta$	$[-]$	Faktor Variationsbreite Fahrzeug- und Fahrwerksparameter
$\theta$	$[^{\circ}]$	Nickwinkel des Fahrzeugaufbaus
$\dot{\theta}$	$[\frac{^{\circ}}{s}]$	Nickgeschwindigkeit
$\ddot{\theta}$	$[\frac{^{\circ}}{s^2}]$	Nickbeschleunigung
$\lambda_l$	$[-]$	Verstärkungsfaktor instationäre Anregung
$\mu_l$	$[-]$	Gewichtungsfaktor einzelner SIs
$\rho$	$[\frac{kg}{m^3}]$	Luftdichte
$\sigma_f$	$[-]$	Abklingkonstante Gierbewegung
$\tau_L$	$[^{\circ}]$	Anströmwinkel des Fahrzeuges um die Gierachse
$\varphi$	$[^{\circ}]$	Wankwinkel des Fahrzeugaufbaus
$\varphi_{R,ij}$	$[^{\circ}]$	Rotationswinkel der Räder
$\dot{\varphi}$	$[\frac{^{\circ}}{s}]$	Wankgeschwindigkeit
$\ddot{\varphi}$	$[\frac{^{\circ}}{s^2}]$	Wankbeschleunigung
$\psi$	$[^{\circ}]$	Gierwinkel des Fahrzeugaufbaus
$\dot{\psi}$	$[\frac{^{\circ}}{s}]$	Giergeschwindigkeit
$\ddot{\psi}$	$[\frac{^{\circ}}{s^2}]$	Gierbeschleunigung
$\omega$	$[Hz]$	gedämpfte Giereigenfrequenz
$\omega_0$	$[Hz]$	ungedämpfte Giereigenfrequenz
$\Omega_h$	$[-]$	allgemeine Bewertungsgröße des Störungsverhaltens
$\Delta p_y$	$[m]$	Querversatz des Fahrzeugs
$\Delta t_l$	$[s]$	Zeitverzug

Die Notation der Größen zu Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten erfolgt nach DIN-70000 [36].

## Indizes

$h$	Variation der Fahrzeug- bzw. Fahrwerksarchitektur
$i$	Unterscheidung Vorderachse (v), Hinterachse (h)
$j$	Unterscheidung Fahrzeugseite Links (l), Rechts (r)
$k$	Variation der Fahrzeug- und Fahrwerksparameter
$l$	Aufbaufreiheitsgrade des Fahrzeugs $x, y, z, \varphi, \theta, \psi$
$m$	aerodyn. Anregungsgröße $F_x, F_y, F_z1, F_z2, M_x, M_z$
$r$	Variation des Typs der Fahrzeugreifen

## Abkürzungen

AFC	Active Flow Control
AK	Anregungskenngröße
AR	aerodynamischer Referenzpunkt
ASP	Schwerpunkt Fahrzeugaufbau
BI	Bewertungsindex
BMW	Bayerische Motorenwerke
BRIT	Brush and Ring Tyre Model
CACSD	Computer-Aided Control System Design
CFD	Computational Fluid Dynamics
CV	charakteristische Größe der Fahrzeugbewegung
DAE	Differential-Algebraic-Equation
DES	Detached Eddy Simulation
DNS	Direct Numerical Simulation
DP	aerodynamischer Druckpunkt
DSC	Dynamic Stability Control
EF	Einflussfaktor
EPS	Electric Power Steering
ESM	Einspurmodell
FEM	Finite-Elemente-Methoden
FEM	Fast-Fourier-Transformation
FP	Fahrwerk- bzw. Fahrzeugparameter
GL	Gummilager
GPS	Global Positioning System
HA	Hinterachse
HAG	Hinterachsgetriebe
HL	Hydrolager
HSR	Hinterradschräglaufwinkelregelung
INS	Inertiales Navigationssystem
K&C	Kinematics and Compliance
LES	Large Eddy Simulation

MKS	Mehrkörpersimulation
MP	Momentanpol
ODE	Ordinary-Differential-Equation
PNL	Punkt-Neutralen-Lenkens
QSG	Quasi-steady Gust
RANS	Reynolds-Averaged Navier–Stokes
REF	Referenzdatensatz Fahrzeugparameter
SI	Sensitivitätsindex
SP	Schwerpunkt Gesamtfahrzeug
STI	Stabilitätsindex
SWA	Seitenwindanlage
TF	Transfer function
USG	Unsteady State Gust
VA	Vorderachse
VRC	Vehicle Response Coefficient
VSI	Sensitivitätsindex Variationsbreite Parameter
VZW	Vorzeichenwechsel
WP	Wankpol des Fahrzeuges

## Kurzfassung

Neben den klassischen Untersuchungen des Seitenwindverhaltens von Personenkraftwagen bei sicherheitsrelevanten Größenordnungen der Seitenwindanregung gilt es darüberhinaus, das Seitenwindverhalten bei komfortrelevanten, durchschnittlichen Anregungsniveaus zu betrachten. In aktuellen Veröffentlichungen zu Untersuchungen der Aerodynamik sind zudem neue Erkenntnisse bezüglich der Ausprägung instationärer aerodynamischer Anregungen vergleichsweise geringerer Anregungsgröße beschrieben. Die Erkenntnisse der hierbei beschriebenen Anregungskenngrößen sowie neue Fahrzeug- und Fahrwerkskonzepte alternativer Antriebskonzepte führen zu neuen Ansätzen der Grundauslegung des Seitenwindverhaltens von Personenkraftwagen. Dabei gilt es, Kenngrößen der Fahrzeug- und Fahrwerksarchitekturen zu identifizieren, die das Seitenverhalten bei instationären Anregungen kleinerer Größenordnung beeinflussen. Ziel ist es dabei, das Seitenwindverhalten gesamthaft zu betrachten und auftretende Zielkonflikte in der Fahrzeugauslegung gegebenenfalls aufzulösen. Die Auswirkungen der instationären Charakteristika auf das Störungsverhalten und das Geradeauslaufverhalten von Kraftfahrzeugen und somit auf die subjektive Wahrnehmung des Fahrers von Fahrdynamik und Fahrkomfort sind die Motivation der vorliegenden Arbeit.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden aus den Erkenntnissen der Aerodynamik generische, charakteristische aerodynamische Anregungen definiert. Das Störungsverhalten unter Seitenwind wird bei einem Anregungsniveau von Starkwinden, in Form eines Versuchs an der Seitenwindanlage, sowie durch eine generische Seitenwindböe mit durchschnittlicher, real auftretender Windgeschwindigkeit betrachtet. Durch Vorgabe der generischen Seitenwindböe wird der komfortrelevante Geradeauslauf von Personenkraftwagen bewertet.

Zur Beschreibung der Fahrzeugbewegung wird die Fahrzeugreaktion unter Seitenwind durch ein Zweispurmodell sowie durch ein Mehrkörpersimulationsmodell abgebildet. Dabei erfolgt eine Validierung der Simulationsergebnisse für die beiden betrachteten Anregungsniveaus mit Ergebnissen aus dem Fahrversuch. Über den Vergleich der Simulationsergebnisse ausgewählter Fahrzeug- und Fahrwerkstypen werden Unterschiede in der Fahrzeugreaktion in Abhängigkeit des Niveaus der Seitenwindanregung aufgezeigt. Der Einfluss einer singulären sowie kombinierter Änderung einzelner Charakteristika der aerodynamischen Anregung auf die Fahrzeugreaktion wird durch eine Simulationsreihe untersucht. Dabei wird die Einflussgröße von Änderungen der Anregungsamplituden im Vergleich zur zeitlichen Zusammensetzung der Anregungsgrößen dargestellt. Daraus wird die Notwendigkeit einer Betrachtung instationärer, aerodynamischer Anregungen ergänzend zu den klassischen Methoden der stationären Aerodynamik abgeleitet.

Durch eine simulative Variation von Fahrzeuggenen und Fahrwerksparametern wird die Einflussgröße einer Parameteränderung auf das Störungsverhalten quantitativ bestimmt. Dabei wird die Einflussgröße der einzelnen Fahrzeugparameter in Abhängigkeit des Anregungsniveaus der aerodynamischen Anregung verglichen. Zur Abschätzung von Stellhebelgrößen einzelner Maßnahmen werden die Variationsbreiten von Fahrzeugparametern innerhalb einer Fahrzeugklasse ermittelt. Zudem wird hier der Einfluss ausgewählter Bauteile detaillierter betrachtet. Hierbei wird ein deutlich höherer Einfluss des Reifens auf das Seitenwindverhaltens im Vergleich zu Gummilagern aufgezeigt. Die Ergebnisse der Bauteileinflüsse lassen auf nicht-lineare Zusammenhänge multi-variater Parameteränderungen schließen.

Die im Rahmen der Untersuchungen betrachteten aerodynamischen Anregungen führen zu kombinierten, stoßförmigen Fahrzeugreaktionen leicht oberhalb der Wahrnehmungsschwellen des Fahrers. Im Zuge einer Probandenstudie werden objektive Kenngrößen der Fahrzeugreaktion mit einer subjektiven Bewertung der Fahrzeugreaktion durch den Fahrer korreliert. Dabei zeigen sich einzelne Amplitudenänderungen der maximalen Querschleunigung und Giergeschwindigkeit sowie der Zeitverzögerungen zwischen maximaler Querschleunigung und Giergeschwindigkeit als besonders relevant für die Bewertung des Störungsverhaltens von Personenkraftwagen. Über den Ansatz der Ermittlung eines Bewertungsfaktors aus den Regressionskoeffizienten der als relevant bewertenden Bewegungsgrößen wird ein Kriterium zur Bewertung des Störungsverhaltens von Personenkraftwagen abgeleitet. Die Berechnung der Bewertungsfaktoren für eine absolute Bewertung allgemeiner Kombinationen der Fahrzeugreaktionen unter Seitenwind zeigt dabei kaum eine Korrelation mit der allgemeinen Bewertung des Störungsverhaltens durch die Probanden. Dies lässt auf eine nicht-lineare Abhängigkeit der subjektiven Wahrnehmung von Amplituden sowie dem zeitlichen Aufbau der Fahrzeugreaktion im Bereich der Wahrnehmungsschwellen schließen.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen wird eine Empfehlung für einen erweiterten Grundauslegungsprozess des Störungsverhaltens von Personenkraftwagen abgeleitet. Neben der bestehenden Methode an der Seitenwindanlage wird dazu ein Ansatz zur komfort-orientierten Ausprägung des Seitenwindverhaltens bei einer instationären Böenanstrengung in der frühen Phase der Fahrzeugentwicklung empfohlen.

## Abstract

Innovative vehicle and chassis concepts like electric-vehicles or hybrid drives challenge the development process of passenger cars. Furthermore recent investigations analyse the impact of unsteady aerodynamic loads on passenger cars with CFD-Methods. Major differences of aerodynamic forces and moments compared to steady state aerodynamic excitations could be identified. In this work the influence of unsteady excitations on the vehicle response was analysed and quantified in order to assure and improve handling and ride characteristics of the actual range of vehicle layouts under crosswind.

According to the standard crosswind stability can be assured through a manoeuvre at a crosswind facility with a high wind velocity of about 50 mph. At ordinary circumstances aerodynamic excitation of crosswind gusts are much lower. Therefore lower amplitudes of crosswind gusts have to be in focus to realise comfort oriented crosswind behaviour of passenger cars. In this thesis three types of aerodynamic excitations were investigated. The excitation of a crosswind facility and representative generic gusts with lower amplitudes were defined. Thereby two different kinds of generic gusts were investigated. Generic gusts with and generic gusts without a change of sign of the impact angle were defined. Depending on the problem, the response under aerodynamic excitations was simulated through a two track vehicle model or a multi-body simulation vehicle model. Through road tests with a mass pendulum the vehicle response to comparatively small aerodynamic excitations was validated. With the mass pendulum it was possible to stimulate the vehicle body with small, defined lateral forces. The validation of the driving dynamics simulation was realised by comparing the measured vehicle response with simulation results. The vehicle response of eight different vehicle models was simulated in order to show the importance of lower aerodynamic excitations for the basic design process of passenger cars. Through the comparison of the simulation results, the differences in the impact of the three aerodynamic excitations types become apparent. The results of a crosswind facility test can lead to the conclusion of good crosswind behaviour of a passenger car whereas the evaluation of the crosswind behaviour under small aerodynamic gusts can have a different result for the same passenger car.

This thesis contributes to the understanding of the effects of unsteady aerodynamic characteristics on the vehicle response. The impact of certain unsteady aerodynamic characteristics on the vehicle response was investigated through a set of simulation experiments with varied aerodynamic generic gusts. Through the definition of an impact factor, the influence of unsteady aerodynamic characteristics on the vehicle response can be quantified. First the impact of amplitude changes was investigated. It is shown that the aerodynamic yaw moment is the key factor for the vehicle response under aerodynamic disturbances. The correlation of multivariate changes of relevant aerodynamic load signals on lateral acceleration, yaw velocity and lateral displacement could be identified as linear. The roll velocity shows a non-linear correlation to multivariate changes of aerodynamic load signals. The non-linear correlation is based on opposed effects of the aerodynamic roll moment and the roll moment caused by inertial forces of the vehicle body. Without any further disturbances like road surface or load-cycle changes in curves changes of the lift forces show minor effects on the vehicle response. Second the impact of time-lag changes of aerodynamic excitations were investigated. The composition in the time course could be identified as important as amplitude changes on the vehicle motion. The vehicle response correlates

non-linear to changes regarding the compositions of time-lags between the relevant aerodynamic scales. Furthermore the influence of realistic unsteady state gusts characteristics on the vehicle response was investigated. Comparing the vehicle response to a corresponding quasi-steady state aerodynamic gust and to a generic gust with unsteady characteristics in combination, the impact of unsteady aerodynamic effects on driving dynamics becomes apparent. The vehicle show a larger vehicle response to the generic gust with unsteady characteristics compared to the response to the quasi-steady state aerodynamic gust. Main impact has the amplification of the aerodynamic yaw moment of an unsteady aerodynamic gust.

By defining a sensitivity index the impact of vehicle and chassis parameter changes on the crosswind behaviour of passenger cars could be quantified and compared in this thesis. In order to compare the influence of changes, the vehicle parameters were changed by 10% at first. The influence of parameter changes on the vehicle response to a crosswind facility and to the generic crosswind gust was compared. Basic vehicle parameters like axle load distribution or total vehicle mass and tyre characteristics show major effects under both excitation levels in the simulation results. The parameter sensitivities verify the possibility of using a crosswind facility in order to improve crosswind behaviour under average crosswind excitations of lower amplitudes. Furthermore the impact factor of vehicle parameters was investigated by analysing a possible variance of characteristics. By analysing the influence of particular chassis parts on the vehicle response, the effect of combined parameter changes was investigated. The results indicate a non-linear effect of combined parameter changes to some extent. In addition the impact of tyres and rubber bearings on the vehicle response under crosswind could be compared.

The influence of differences in the multi-dimensional vehicle response to unsteady and steady state aerodynamic excitations on the driver perception was investigated through a test setup in a dynamic driving simulator. Thereby the investigated amplitudes of vehicle motion characteristics were slightly above perception thresholds for particular motion parameters. Through a first series of simulator tests the perception of particular changes of motion signals could be investigated. Here the maximum lateral acceleration, the yaw velocity and the time-lag between the peak values of lateral acceleration and yaw velocity could be identified as key driver for the driver assessment of crosswind behaviour next to perception thresholds. By calculating a regression factor of the probands evaluation and the vehicle motion characteristics, a hierarchy of the importance of motion signals for the driver's perception could be realised. In a second probands series the crosswind behaviour of different cars under representative unsteady aerodynamic gusts was evaluated. A general weighting factor for an absolute crosswind evaluation can't be identified in this investigation. This indicates a non-linear influence of vehicle motion signals with amplitudes slightly above perception thresholds on the driver perception.

For the early stage of the vehicle development a basic design process for small unsteady aerodynamic gusts is suggested. Through CFD-simulations unsteady characteristics of an aerodynamic gust can be identified for specific vehicle bodies. By knowing the time-courses of forces and moments of a representative unsteady aerodynamic gust the vehicle response can be simulated. Through tests in a dynamic driving simulator the absolute evaluation of the crosswind behaviour under comparatively small excitations can be achieved without having a hardware prototype.

# 1. Einleitung

Die Fahrerwahrnehmung des Fahrkomforts, der Richtungsstabilität und des Lenkverhaltens von Personenkraftwagen bei hohen Reisegeschwindigkeiten wird deutlich durch aerodynamische Anregungen beeinflusst. Das Bestreben nach einer weiteren Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emission von Personenkraftwagen sowie der Kundenwunsch nach innovativen Fahrzeugkonzepten sind Haupttreiber der aktuellen Fragestellungen der Kraftfahrzeugforschung. Neue Fahrzeugarchitekturen wie elektromotorbetriebene Personenkraftwagen oder Hybridantriebe führen zu deutlich geänderten Grundauslegungsparametern im Vergleich zu herkömmlichen Architekturen. Die unterschiedlichen Kombinationen der Fahrzeugparameter wie z.B. geometrische Kenngrößen oder Massenverteilungen können zu neuen Herausforderungen in der Grundauslegung von Fahrzeug- und Fahrwerksarchitekturen führen. Zudem bestimmen Maßnahmen zur Gewichtsreduktion sowie die stetige Steigerung der funktionalen Umfänge der Fahrzeuge die Entwicklung moderner Kraftfahrzeugarchitekturen. Die hierbei resultierenden Architekturkonzepte bringen neue Herausforderungen für die Detailauslegung von Personenkraftwagen. Dies trifft auch auf die Auslegung des Seitenwindverhaltens von Personenkraftwagen zu. Vor allem die Zielsetzung einer Minimierung des Energieverbrauchs von Kraftfahrzeugen führt zu Randbedingungen der Fahrzeugarchitektur, die einen maßgeblichen Einfluss auf die Seitenwindempfindlichkeit von Personenkraftwagen haben. Es zeigt sich, dass eine Optimierung des Luftwiderstands der Fahrzeuge zu einem Anstieg der Seitenwindempfindlichkeit der Personenkraftwagen [69, 171] führen kann. Hierbei gilt es, den Einfluss der im Wandel befindlichen Fahrzeugparameter auf das Seitenwindverhalten der Personenkraftwagen zu analysieren und in der Grundauslegung zu berücksichtigen.

Auch wenn die ersten, detaillierten Untersuchungen des Seitenwindverhaltens von Personenkraftwagen durch Herrn Professor Kamm bereits in den 1930er-Jahren erfolgten [130], so ist die Fragestellung der Optimierung der Fahrdynamik unter Seitenwindeinfluss auch heute noch und wieder mehr von Bedeutung. Unter Berücksichtigung der zunehmenden Urbanisierung der Weltbevölkerung könnte man zwar davon ausgehen, dass die Relevanz des Seitenwindverhaltens von Personenkraftwagen aufgrund niedrigerer Reisegeschwindigkeiten in den Ballungsräumen abnimmt. Jedoch ist ein Anstieg der durchschnittlichen Wegstrecke pro Fahrt mit Personenkraftwagen bei einer unterproportional steigenden durchschnittlichen Wegzeit in Deutschland festzustellen [22]. Dieser Umstand lässt den Schluss zu, dass trotz fortschreitender Urbanisierung die durchschnittliche Reisegeschwindigkeit mit Personenkraftwagen steigt, was durch den steigenden Pendelverkehr zwischen den Ballungszentren begründet sein kann. Betrachtet man zudem die Unfallstatistik der Bundesrepublik Deutschland, so kann Seitenwind als eine Unfallursache mit Personenkraftwagen identifiziert werden. In Abbildung 1.1 sind die Unfallzahlen mit Personenkraftwagen des Zeitraums 2008 bis 2012 aufgeführt die auf den Einfluss von Seitenwind zurückzuführen sind.

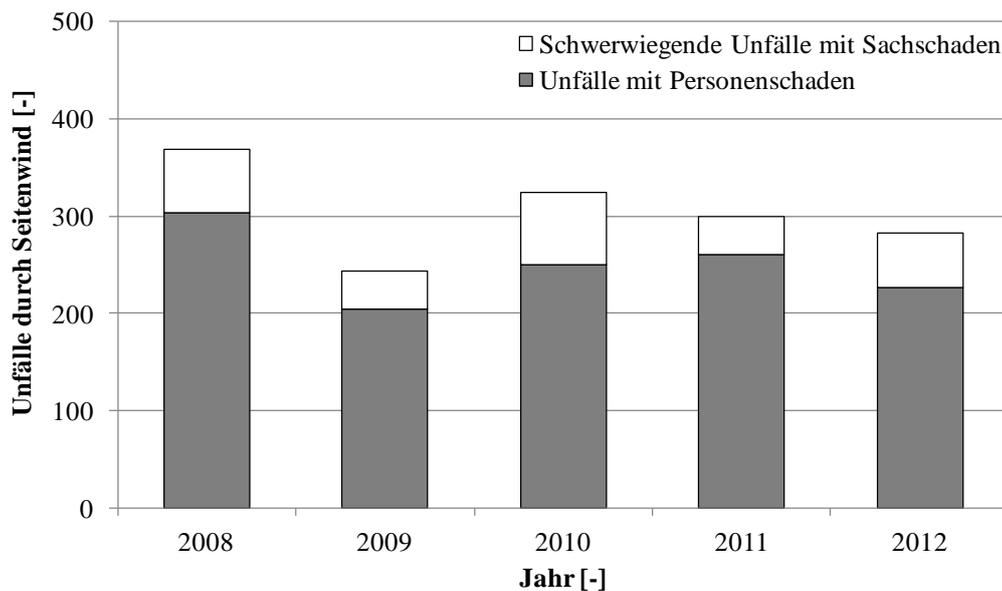


Abbildung 1.1.: Unfallzahlen durch Seitenwind des Statistischen Bundesamtes [152–156]

Die hierbei dargestellten Unfallhäufigkeiten bestätigen den Bedarf einer Fahrzeug- und Fahrwerksauslegung bezüglich des Seitenwindverhaltens von Personenkraftwagen. Klimaszenarien für den mitteleuropäischen Raum zeigen zudem eine Intensivierung der natürlichen Windverhältnisse in den Wintermonaten bis zum Ende des Jahrhunderts um bis zu 14 % auf [109]. Dies verdeutlicht, in Anbetracht der stetig steigenden Ansprüche des Kunden an Komfort und Sicherheit von Personenkraftwagen, die Relevanz des Seitenwindverhaltens von Kraftfahrzeugen zur kundenorientierten Ausprägung des Fahrverhaltens.

Um auf dem globalen Automobilmarkt wettbewerbsfähige Produkte anbieten zu können, sind Automobilhersteller bestrebt, eine virtuelle und somit kostengünstige Auslegung der Kraftfahrzeuge zu realisieren. Dies wird im Bereich der effizienten Entwicklung moderner Fahrwerke besonders deutlich [56]. Ziel ist es hierbei, durch Simulationsverfahren bereits in der frühen Phase der Entwicklung robuste Aussagen bezüglich der Grundausslegung des Fahrverhaltens zukünftiger Fahrzeug- und Fahrwerksarchitekturen abzuleiten. Das Bestreben nach einer effizienten Gestaltung des Entwicklungsprozesses zeigt sich auch im Bereich der Aerodynamik von Kraftfahrzeugen. Die stetige Weiterentwicklung der numerischen Methoden zur Abbildung strömungsmechanischer Phänomene führt zu einer detaillierteren simulativen Analyse der Aerodynamik in der Kraftfahrzeugtechnik. Auch das steigende Angebot kommerziell und effizient nutzbarer Software zur numerischen Strömungsmechanik verstärkt die Einbindung simulativer Methoden in den aerodynamischen Entwicklungsprozess der Automobilindustrie. Die in der Aerodynamik gewonnenen, neuen Erkenntnisse zeigen besondere Charakteristika instationärer Anregungen von Personenkraftwagen. Die Auswirkungen dieser Charakteristika auf die Fahrzeugbewegung und somit auf die subjektive Wahrnehmung des Fahrers von Fahrdynamik und Fahrkomfort sind die Motivation der vorliegenden Arbeit. Aus den gewonnenen Erkenntnissen gilt es, einen Grundausslegungsprozess für das Seitenwindverhalten bei einer instationären Böenanstrengung für die frühe Phase der Fahrzeugentwicklung abzuleiten.

## 2. Stand der Technik und Zielsetzung

Im Folgenden wird der Stand der Technik zur Ermittlung, Bewertung und Auslegung des Seitenwindverhaltens von Personenkraftwagen beschrieben. Zunächst werden die Phänomene des Seitenwindverhaltens von Personenkraftwagen erläutert und die dazu in der Literatur aufgezeigten Erkenntnisse der Wirkkette dargestellt.

### 2.1. Phänomene des Seitenwindverhaltens

Unter Seitenwindverhalten, oder auch Seitenwindempfindlichkeit genannt, wird die Reaktion von Kraftfahrzeugen auf aerodynamische Anregungen verstanden. Die aerodynamische Anregung kann dabei durch unterschiedliche Ursachen hervorgerufen werden. Dies können zum Einen natürliche Windböen oder eine konstante Seitenwindanregung bei wechselnden Randbedingungen der Straßenführung wie z.B. Brückenüberfahrten, Lärmschutzwände, Waldlichtungen und Straßentunnel sein. Zudem können aerodynamische Anregungen an Personenkraftwagen aus Vorbeifahrten oder Überholvorgängen anderer Kraftfahrzeuge entstehen. Vor allem bei höheren Fahrzeuggeschwindigkeiten  $> 120\text{km/h}$  ist das Seitenwindverhalten signifikant für die subjektive Bewertung des Fahrzeugverhaltens durch den Fahrer [68].

Im Folgenden wird zunächst die zur Erläuterung des Standes der Technik genutzte Strukturierung der Phänomene des Seitenwindverhaltens beschrieben. Dabei lässt sich das Seitenwindverhalten von Personenkraftwagen in zwei unterschiedliche Phänomene unterteilen. Es wird das Störungs- und Führungsverhalten unterschieden. Die folgende Abbildung 2.1 zeigt eine Darstellung der Zusammenhänge des Seitenwindverhaltens von Kraftfahrzeugen unterteilt in aerodynamische Anregung, Störungs- und Führungsverhalten.

Unter Störungsverhalten, auch „passives Seitenwindverhalten“ genannt, wird die direkte Reaktion des Fahrzeuges auf eine aerodynamische Anregung verstanden. Aus der resultierenden Anströmung der aerodynamischen Störgröße ergeben sich entsprechend der Form und der Durchströmung des Fahrzeuges die Kräfte und Momente am Fahrzeugaufbau. Die durch die aerodynamischen Kräfte und Momente resultierende Fahrzeugreaktion führt entsprechend der visuellen, akustischen, vestibulären, propriozeptiven und haptischen Sinneswahrnehmung zu einer subjektiven Bewertung des Störungsverhaltens durch den Fahrer. Das Störungsverhalten des Fahrzeuges ist somit eine Betrachtung des Fahrzeugverhaltens ohne den regelnden Eingriff durch den Fahrer und wird daher als Open-Loop („offener Regelkreis“) bezeichnet. Wird bei einem Open-Loop Manöver der Lenkwinkel als konstant vorgegeben, so wird die Betrachtung als „fixed-control“ bezeichnet.

Das Führungsverhalten von Kraftfahrzeugen beschreibt die Reaktion des Fahrzeuges bei einem Lenkeingriff durch den Fahrer. Die aerodynamischen Kräfte sind hierbei somit nicht direkt ursächlich für die Fahrzeugreaktion, sondern beeinflussen die Reaktion und Rückmeldung des

## 2. Stand der Technik und Zielsetzung

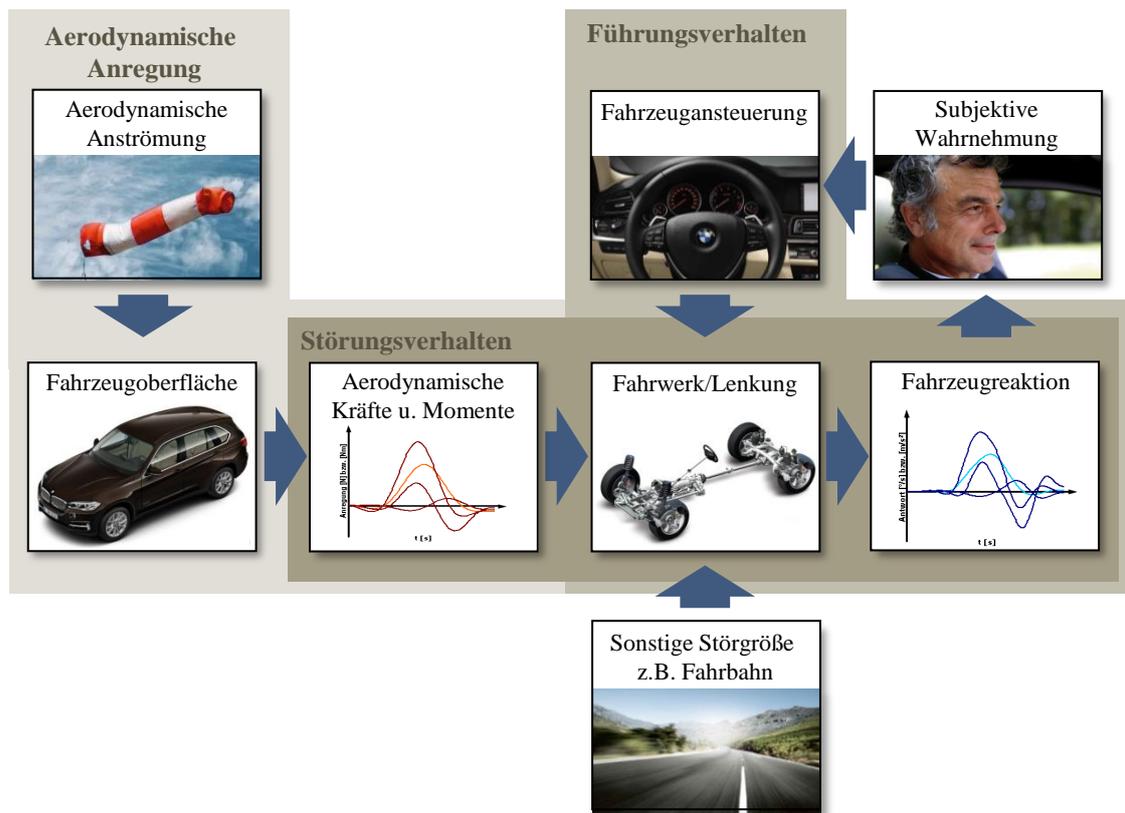


Abbildung 2.1.: Beschreibung der Wirkkette des Seitenwindverhaltens von Kraftfahrzeugen

Fahrzeuges an den Fahrer auf eine Lenkwinkleingabe. Wird die Annahme einer fest vorgegebenen Ansteuerung des Fahrzeuges durch den Fahrer getroffen, wird das Führungsverhalten als Open-Loop betrachtet. Wie beim Störungsverhalten führt die resultierende Fahrzeugreaktion aufgrund des Führungsverhaltens entsprechend der Sinneswahrnehmung zu einer subjektiven Bewertung durch den Fahrer.

Wird nun die Kopplung des Störungs- und Führungsverhalten über die subjektive Wahrnehmung des Fahrers betrachtet, führt dies zu einer Closed-Loop („geschlossener Regelkreis“) Betrachtung des Seitenwindverhaltens. Diese Betrachtung wird auch als „aktives Seitenwindverhalten“ bezeichnet. Bei dieser Betrachtung erfolgt der Lenkeingriff als Resultat der subjektiven Wahrnehmung der Fahrzeugreaktion auf aerodynamische Einflüsse. Der Fahrer versucht hierbei die Fahrzeugreaktion durch einen Regeleingriff über Lenkung, Bremse oder Kupplung zu verringern bzw. auszugleichen. Es wird somit der Regelkreis aus Seitenwind, Kraftfahrzeug und Fahrer betrachtet.

Unter natürlichen Straßenbedingungen wird das Seitenwindverhalten des Personenkraftwagens von zusätzlichen Störgrößen überlagert. Dies können zum Beispiel Anregungen durch Fahrbahnunebenheiten oder Einflüsse der Antriebsmomente auf die Fahrzeugbewegung sein. Hierbei gilt es, den Seitenwindeinfluss entkoppelt von Störgrößen ähnlicher Bewegungsamplituden und -verläufe zu betrachten. Im Folgenden werden die Bestandteile der in Abbildung 2.1 beschriebenen Wirkkette des Seitenwindverhaltens von Personenkraftwagen im Detail erläutert.

## 2.2. Aerodynamische Anregung

Zur Untersuchung des Seitenwindverhaltens von Personenkraftwagen gilt es, die ursächlichen, aerodynamischen Anregungen zu beschreiben. Aus der aerodynamischen Anströmung des Fahrzeuges können die resultierenden Kräfte und Momente am Fahrzeug bestimmt werden. Im folgenden Abschnitt wird zunächst auf die vorherrschenden Anströmungsverhältnisse unter realen Bedingungen eingegangen.

### 2.2.1. Aerodynamische Anströmung

Zur Messung der aerodynamischen Anströmung unter natürlichen Bedingungen können entsprechend des angestrebten Detaillierungsgrades unterschiedliche Messapparaturen wie z.B. Hitzdrahtanemometer, Strömungsrichtungssonden oder Differenzdruckaufnehmer genutzt werden [141, 164, 174]. Die aerodynamische Anströmung des Fahrzeuges ergibt sich dabei aus der Überlagerung der Anströmung durch die natürlich auftretenden Windverhältnisse und der Anströmung aus der Fahrzeugbewegung.

Die aerodynamische Anströmung des Fahrzeugaufbaus aus der Fahrzeugbewegung ergibt sich aus der Bewegung entlang der Bahntrajektorie und der rotatorischen Aufbaubewegung durch Wank-, Nick und Gierbewegung. Die Geschwindigkeit der aerodynamischen Anströmung durch natürlichen Seitenwind kann entlang der Fahrzeugoberfläche der Personenkraftwagen lokal unterschiedlich sein. Die Ausbildung einer Grenzschicht in Straßennähe führt generell zu einer variierenden Strömungsgeschwindigkeit entlang der Fahrzeughochachse [69]. Durch eine turbulente Ausprägung der Seitenwindböen ergeben sich komplexe Geschwindigkeitsfelder der Fahrzeuganströmung.

Zur vereinfachten Darstellung kann die Anströmgeschwindigkeit durch natürlichen Seitenwind auf den Geschwindigkeitsvektor  $v_{Wind}$  gemittelt werden. Abbildung 2.2 zeigt die gemittelte Zusammensetzung der Anströmung des Gesamtfahrzeugs.

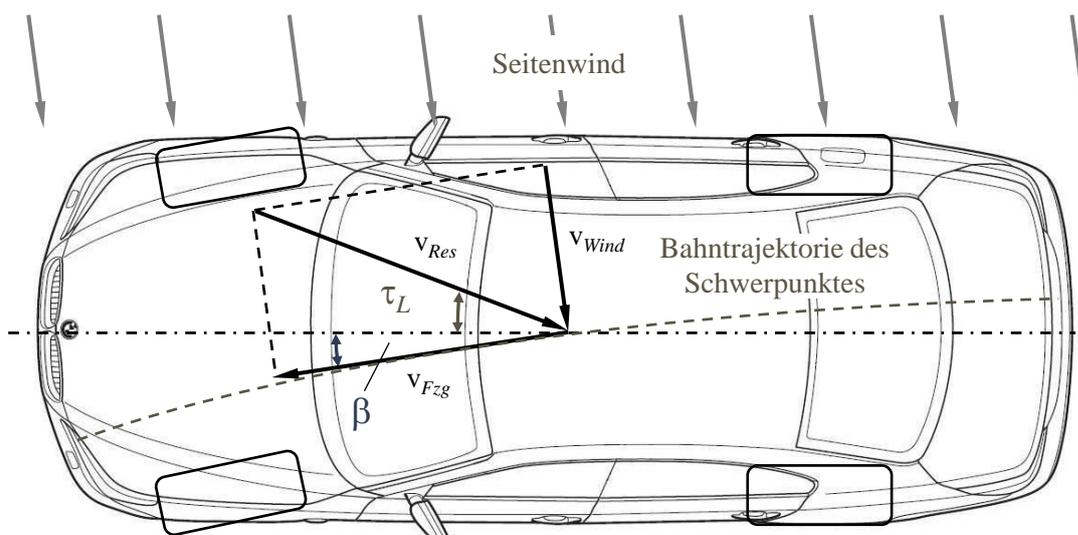


Abbildung 2.2.: Vereinfachte Darstellung der Fahrzeuganströmung in der Horizontalebene

## 2. Stand der Technik und Zielsetzung

Die Geschwindigkeit der aerodynamischen Anströmung aus der Fahrzeugbewegung kann aus dem Geschwindigkeitsvektor der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{Fzg}$  vorgegeben werden. Die Karosserie wird dabei entsprechend des je nach Fahrmanöver auftretenden Schwimmwinkels  $\beta$  relativ zur Fahrzeuglängsachse angeströmt. Die resultierende Anströmgeschwindigkeit des Fahrzeugaufbaus ergibt sich aus folgendem Zusammenhang (2.1).

$$\mathbf{v}_{Res} = -\mathbf{v}_{Fzg} + \mathbf{v}_{Wind} \quad (2.1)$$

Die unter realen Bedingungen auftretenden qualitativen und quantitativen Charakteristika der Fahrzeuganströmung lassen sich aus Messergebnissen natürlicher Seitenwindböen ableiten [66, 138, 174]. In [183] wird der qualitative Verlauf des Anströmwinkels betrachtet. Abbildung 2.3 zeigt die hierbei ermittelte Verteilung der qualitativen Verläufe natürlicher Seitenwindböen.

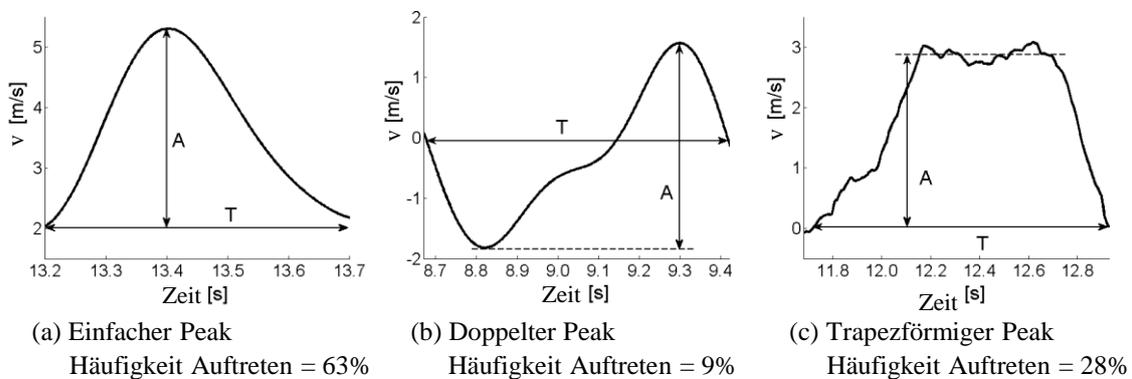


Abbildung 2.3.: Verteilung qualitativer Verläufe natürlicher Seitenwindböen nach [183]

Es zeigt sich, dass der Hauptteil der auftretenden Böen in der Horizontalebene dem qualitativen Verlauf eines einfachen Peaks entspricht. 72 % der Seitenwindböen weisen dabei einen Vorzeichenwechsel im Verlauf des Anströmwinkels auf. Neben dem qualitativen Verlauf der aerodynamischen Anströmung gilt es, den Frequenzbereich real auftretender Seitenwindböen zu charakterisieren. Die folgende Tabelle 2.1 zeigt eine Übersicht charakteristischer Frequenzbereiche aerodynamischer Störungen in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit, die unter realen Straßenbedingungen auftreten.

Frequenzbereich [Hz]	Geschwindigkeitsbereich $v_{Fzg}$ [km/h]	Quelle
0.2 - 0.5	140 - 250	[27]
0.4 - 1.0	140 - 210	[66]
~1.0	100	[177]
1.0 - 1.5	140	[183]

Tabelle 2.1.: Übersicht charakteristischer Frequenzbereiche realer Seitenwindböen

Der hierbei identifizierte charakteristische Frequenzbereich der Seitenwindanregung variiert dabei zwischen minimal 0.2 bis maximal 1.5 Hz für einen Geschwindigkeitsbereich des Fahrzeugs ab 140 km/h. Die folgende Abbildung 2.4 zeigt eine Darstellung der Böenhäufigkeit in Abhängigkeit des Frequenzbereichs bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 140 km/h nach [183].

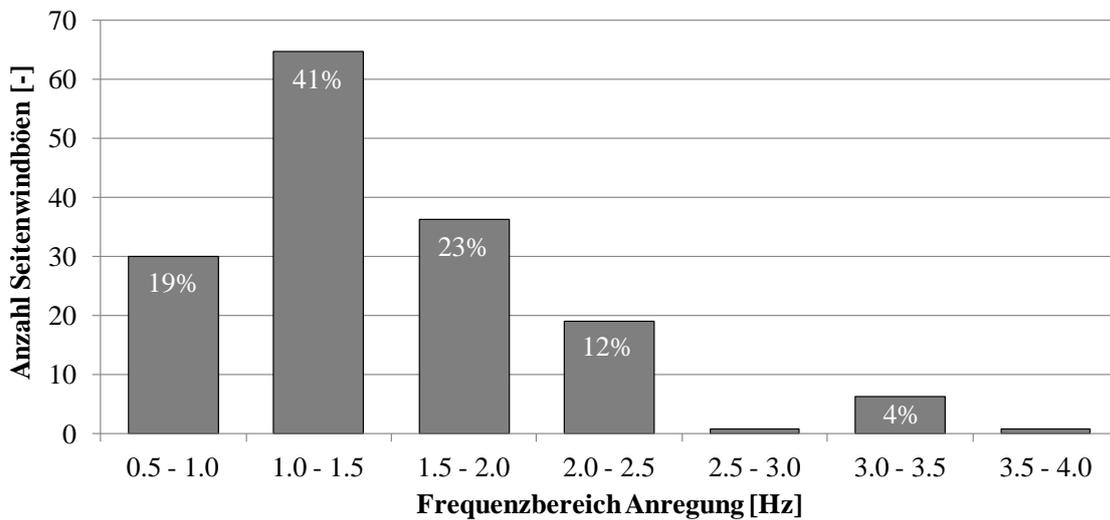


Abbildung 2.4.: Häufigkeit der Böenanregung entsprechend Frequenzbereich nach [183]

Zur Abschätzung der Amplituden real auftretender aerodynamischer Anregungen ist in folgender Tabelle 2.2 eine Übersicht von Messwerten der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit sowie der Windgeschwindigkeit von Starkwinden unter realen Straßenbedingungen aufgezeigt.

Betrachtet man die hier aufgezeigten Amplituden der natürlichen Windanregung, so zeigt sich eine mittlere Windgeschwindigkeit zwischen 3 m/s und 6 m/s, was einer Windstärke  $B$  von 2 bis 4 Bft entspricht. Gemessene Starkwinde weisen Windgeschwindigkeiten zwischen 10 m/s bis 32 m/s auf, was einer Windstärke von 6 bis 12 Bft entspricht. Aufgrund der hier beschriebenen Mittelwerte der Windgeschwindigkeiten können die hauptsächlich auftretenden aerodynamischen Anregungen im Vergleich zu Starkwinden als gering bezeichnet werden.

Neben den Messungen der Anströmverhältnisse bei natürlichen Seitenwindböen wurden auch die Strömungsverhältnisse bei Überholvorgängen und Vorbeifahrten von Kraftfahrzeugen im Realversuch über Drucksonden an der Fahrzeugoberfläche vermessen [141]. Dabei variieren die Anströmungsverhältnisse je nach geometrischen Abmessungen der beteiligten Fahrzeuge sowie entsprechend der Geschwindigkeitsunterschiede der am Überholvorgang bzw. an der Vorbeifahrt beteiligten Fahrzeuge.

Um die Einflussgröße der aerodynamischen Anströmung auf die Fahrzeugbewegung bewerten zu können, gilt es die resultierenden Kräfte und Momente am Fahrzeug zu bestimmen. Im Folgenden wird die Ermittlung der aerodynamischen Kräfte und Momente aus der aerodynamischen Anströmung erläutert.

Region	Windgeschwindigkeit im Durchschnitt [ $\frac{m}{s}$ ]	Windgeschwindigkeit Starkwinde [ $\frac{m}{s}$ ]	Quelle
Canada	1-4	-	[28]
Großbritannien	4-5	20-24	[65]
Japan	2-7	10-20	[101]
Norddeutschland	6-7	-	[92]
Süddeutschland	2-3	-	
Norddeutschland	< 6	32	[96]
Süddeutschland	< 6	24	
Süddeutschland	3-5	-	[184]
Norddeutschland	3-5	-	[190]
Süddeutschland	< 3	-	

Tabelle 2.2.: Auswahl gemessener Windgeschwindigkeiten in Abhängigkeit des Messortes

### 2.2.2. Aerodynamische Kräfte und Momente

Aus der aerodynamischen Anströmung können die aerodynamischen Kräfte und Momente messtechnisch und simulativ ermittelt werden. Zur Definition der aerodynamischen Anregung an Personenkraftwagen werden die Kräfte und Momente der sechs Freiheitsgrade des Fahrzeugaufbaus beschrieben. Abbildung 2.5 zeigt eine Darstellung der Kräfte und Momente am Fahrzeugaufbau.

Bei der Untersuchung der aerodynamischen Kräfte und Momente werden zwei Arten der aerodynamischen Anregung des Fahrzeuges unterschieden. Es wird dabei zwischen einer stationären und einer instationären aerodynamischen Anregung unterschieden [69]. Man spricht von einer stationären aerodynamischen Anregung, wenn das Fahrzeug konstant mit einem kontinuierlichen Geschwindigkeitsfeld angeströmt wird. Eine instationäre aerodynamische Anregung liegt vor, wenn das Fahrzeug einer zeitlich variierenden, beziehungsweise turbulenten Anströmung ausgesetzt ist. Aufgrund der hohen Relevanz für den Kraftstoffverbrauch stehen bei der Ermittlung der aerodynamischen Kräfte und Momente von Personenkraftwagen die aerodynamischen Kräfte in Fahrzeuginnenrichtung im Vordergrund. Im Folgenden werden zunächst die Methoden zur messtechnischen Bestimmung der Anregungsgrößen in einem Windkanal erläutert.

In einem Windkanalversuch können neben der qualitativen Analyse von Durch- und Umströmung von Kraftfahrzeugen auch die aerodynamischen Kräfte und Momente quantitativ bestimmt werden. Hierzu werden Versuche mit maßstabgetreuen Fahrzeugen, mit Miniaturmodellen z.B. im Maßstab 1:4 oder 1:10 [80] sowie mit Prinzipkörpern zur Phänomenanalyse durchgeführt. Modellversuche haben oftmals den Nachteil, dass die Fahrzeugtopologie nur mit einem

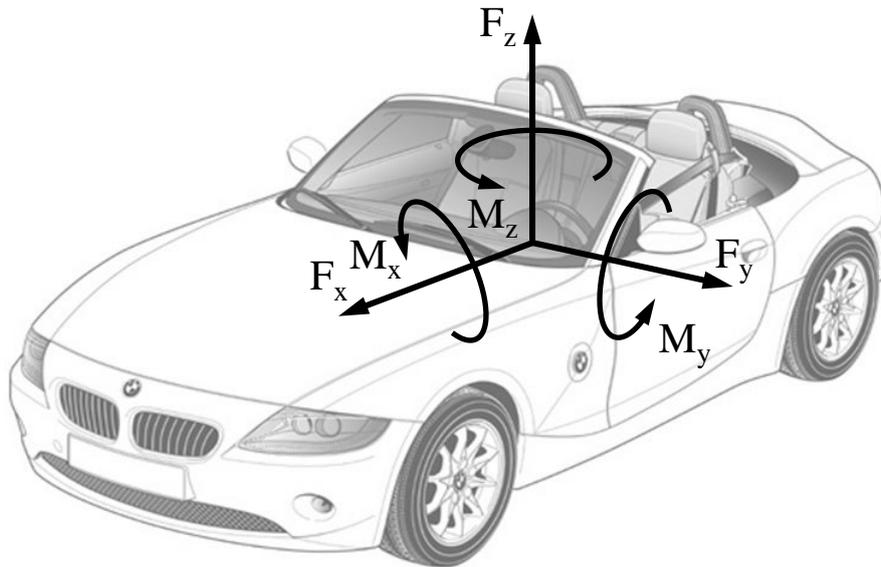


Abbildung 2.5.: Darstellung der Kräfte und Momente des Fahrzeugaufbaus

geringeren Detaillierungsgrad als das reale Fahrzeug dargestellt werden kann. Oftmals sind zudem die Durchströmungsverhältnisse des Fahrzeuges hierbei nur eingeschränkt abbildbar. Diese können aber einen Einfluss auf die ermittelten Anregungsgrößen haben [179].

Die technische Realisierung von Windkanalaufbauten wurde fortwährend weiterentwickelt, so dass diverse Architekturkonzepte für Windkanäle bestehen [70]. Moderne Windkanäle verfügen über einen aufwendigen Aufbau zur Darstellung möglichst reproduzierbarer Randbedingungen [39, 146]. Abbildung 2.6 zeigt den Windkanal des Aerodynamischen Versuchszentrums der BMW Group.

Zur Abbildung reproduzierbarer Randbedingungen wird in einem Windkanal ein möglichst großes Volumen des Messraums angestrebt. Dies ist notwendig, um den störenden Einfluss auftretender Grenzschichtturbulenzen an den Raumwänden zu vermeiden. Über eine Absaug- beziehungsweise Abschervorrichtung wird die turbulente Grenzschicht in Bodennähe vor dem zu messenden Fahrzeug entfernt. Eine Regelungsmöglichkeit der Temperatur des umströmenden Fluids ermöglicht konstante Bedingungen während der Messung. Durch ein unter dem Fahrzeug befindliches Laufband wird die überfahrene Fahrbahnoberfläche abgebildet. Zur Abbildung der Umströmungsverhältnisse des rotierenden Rades im Radkasten kann zudem ein Antrieb der Räder über das Laufband erfolgen. Oftmals werden die Räder auch durch zusätzliche, neben einem Zentrallaufband befindliche Laufbänder oder Rollen angetrieben. Durch eine unter den Fahrzeugrädern befindliche Waage beziehungsweise über eine Kraftmessensorik an einer Fahrzeugaufhängung können die resultierenden Anregungsgrößen in den sechs Freiheitsgraden des Fahrzeuges ermittelt werden.

Um eine stationäre, aerodynamische Anregung abzubilden, wird das Fahrzeug über die gesamte Querspanntfläche  $A_q$  konstant angeströmt. Aus den hier gemessenen Kräften und Momenten der sechs Freiheitsgrade werden aerodynamische Beiwerte  $c_i$  ermittelt, die von der Anströmgeschwindigkeit unabhängig sind. Die hierbei ermittelten Kräfte und Momente beziehen



Abbildung 2.6.: Darstellung des aerodynamischen Windkanals im Aerodynamischen Versuchszentrum der BMW Group

sich meist auf einen aerodynamischen Referenzpunkt. Im Folgenden liegt der aerodynamische Referenzpunkt in der Mitte des Radstands und der Spurweite auf Höhe der Fahrbahnoberfläche. Oft wird dabei der Beiwert für das aerodynamische Moment um die Querachse des Fahrzeuges nicht explizit bestimmt. Das aerodynamische Nickmoment ergibt sich durch die Angabe von zwei Beiwerten für die aerodynamischen Kräfte in vertikaler Richtung an Vorder- und Hinterachse, den Auftriebsbeiwerten. Der Zusammenhang der Beiwerte ist in Gleichung (2.2) aufgezeigt.

$$c_{My} = (c_{z2} - c_{z1})/2 \quad (2.2)$$

Ziel der aerodynamischen Grundauslegung von Personenkraftwagen ist die Minimierung der aerodynamischen Beiwerte. Zur Reduktion der aerodynamischen Widerstandskräfte und somit des Kraftstoffverbrauchs gilt es, den Beiwert  $c_x$ , oftmals auch  $c_w$  genannt, zu reduzieren. Die Kenngrößen des Giermomentenbeiwertes  $c_{Mz}$ , des Wankmomentenbeiwertes  $c_{Mx}$  sowie des Querkraftbeiwertes  $c_y$  sind vor allem zur Verbesserung des Störungsverhaltens bei Seitenwind zu betrachten. Die Verringerung der Auftriebsbeiwerte  $c_{z1}$  und  $c_{z2}$  hat eine Verbesserung der Fahreigenschaften der Personenkraftwagen zum Ziel [16]. Bei einem Lastwechsel in einer Kurvenfahrt beziehungsweise bei zusätzlichen vertikalen Anregungen durch Bodenwellen haben die Auftriebskräfte einen signifikanten Einfluss auf die Stabilität und das Fahrverhalten des Fahrzeuges [48]. Dabei zeigt eine Verringerung der Auftriebsbeiwerte an der Hinterachse in besonderem Maße eine Verbesserung des Führungsverhaltens der Kraftfahrzeuge [95]. In [38] wird die Abhängigkeit der Auftriebsbeiwerte von den Höhenständen an Vorder- und Hinterachse zudem als ein relevanter Zusammenhang für den Fahrkomfort beschrieben. Die Änderung der Auf-

triebsbeiwerte in Abhängigkeit des fahrbahninduzierten Radhubes wird dabei für die Aufbaubewegung als dämpfend beziehungsweise verstärkend beschrieben.

Das Bestreben nach einer Minimierung der aerodynamischen Beiwerte zeigt einen weiteren Zielkonflikt der Fahrzeugentwicklung auf. Betrachtet man die aerodynamischen Beiwerte unterschiedlicher Fahrzeuge, so weisen einige Fahrzeuge mit einem niedrigeren Widerstandsbeiwert in Fahrzeuggängsrichtung tendenziell einen vergleichsweise höheren Auftriebsbeiwert an der Hinterachse auf [17, 150, 171].

Die aerodynamischen Beiwerte des Fahrzeuges sind vom Winkel der aerodynamischen Anströmung abhängig. Dies zeigt sich vor allem bei einer Änderung des Anströmwinkels  $\tau$  um die Gierachse, die Achse in Vertikalrichtung des Fahrzeuges. Durch eine inkrementale Variation des Anströmwinkels  $\tau$  im Windkanal können stationäre Kennfelder der aerodynamischen Beiwerte ermittelt werden. Abbildung 2.7 zeigt ein derartiges Kennfeld für die sechs aerodynamischen Beiwerte in Abhängigkeit des Anströmwinkels  $\tau$  um die Gierachse.

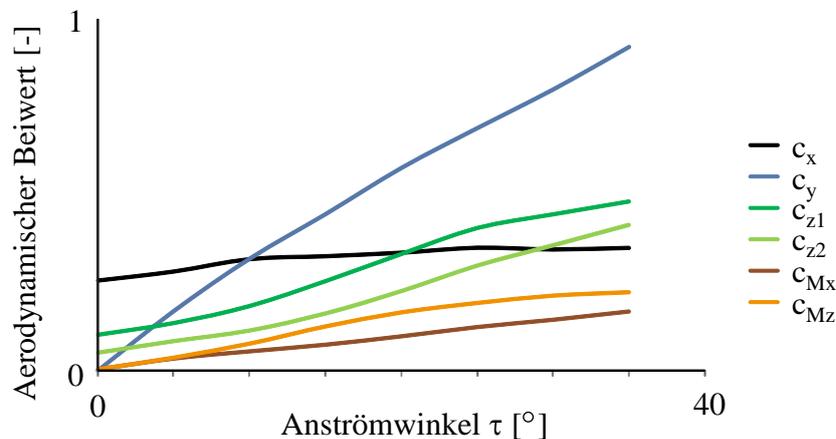


Abbildung 2.7.: Kennfeld aerodynamischer Beiwerte in Abhängigkeit des Anströmwinkels  $\tau$

Die Kennlinien der aerodynamischen Beiwerte können in Näherung in einem Bereich der Anströmwinkel von  $\tau = 0^\circ$  bis  $\tau = 30^\circ$  als linear beschrieben werden. Auch eine Variation des Anströmwinkels um die Nickachse, die Querachse des Fahrzeuges, führt zu einem Einfluss auf die aerodynamischen Beiwerte. Hierbei können die Auftriebsbeiwerte des Fahrzeuges maßgeblich beeinflusst werden [6, 85]. Durch die aerodynamischen Beiwerte können die aerodynamischen Kräfte bei einer vorgegebenen, stationären Anströmung berechnet werden. Gleichung (2.3) zeigt die Berechnung der aerodynamischen Seitenkraft mit dem Querkraftbeiwert  $c_y$

$$F_y = \frac{\rho}{2} A_q c_y |\mathbf{v}_{Res}|^2 \quad (2.3)$$

Die Berechnung der aus einer stationären, aerodynamischen Anströmung resultierenden Momente ist in Gleichung (2.4) für das aerodynamische Giermoment dargestellt.

$$M_z = \frac{\rho}{2} A_q c_{Mz} l_s |\mathbf{v}_{Res}|^2 \quad (2.4)$$

Durch die Vorgabe eines zeitlich variierenden Anströmwinkels  $\tau(t)$  lässt sich auf Basis der stationär ermittelten aerodynamischen Kennfelder ein transienter Verlauf der aerodynamischen

Kräfte und Momente am Fahrzeug unter einer quasi-stationären Betrachtung darstellen [66]. Dabei stehen die Verläufe der aerodynamischen Seitenkraft, des aerodynamischen Giermoments und des aerodynamische Wankmoments entsprechend der Steigung der Kennlinien bei linearer Betrachtung in einem definierten Verhältnis. Wird im Zeitverlauf des Anströmwinkels ein Peakwert vorgegeben, so weisen die genannten aerodynamischen Anregungsgrößen auch einen Peakwert auf. Die aerodynamischen Anregungsgrößen sind hierbei somit in Phase. Derartig ermittelte, zeitlich variierende Anregungen werden im Folgenden zur Unterscheidung von instationären Anregungen, die von einander unabhängige Anregungsgrößen aufweisen, als transiente, quasi-stationäre aerodynamische Anregungen bezeichnet.

Neben der Messung stationärer, aerodynamischer Anregungsgrößen werden in Windkanalversuchen auch instationäre Phänomene betrachtet. Dabei werden zwei unterschiedliche Versuchsaufbauten zur Abbildung einer zeitlich variierenden Anströmung realisiert.

Zum Einen wird durch Rotation des Fahrzeugkörpers bei konstanter aerodynamischer Anströmung eine reproduzierbare, zeitlich variierende Anströmung realisiert. Dabei wird der Fahrzeugkörper meist um die Gierachse rotiert. Versuche mit Prinzipkörpern zeigen dabei Unterschiede in den Verläufen der aerodynamischen Kräfte und Momente vergleichbarer transienter Anregungsamplituden [24, 43, 55]. Versuche mit Fahrzeugminiaturmodellen zeigen ähnliche Ergebnisse [162, 163]. Zum Anderen wird mittels eines Böengenerators eine instationäre, turbulente Anströmung realisiert [26, 126, 140, 142, 143]. Auch hierbei zeigen sich Unterschiede der auftretenden Kräfte und Momente bei instationärer Anregung im Vergleich zu stationären Anregungen ähnlicher Größenordnung. Abbildung 2.8 zeigt exemplarisch die Überhöhung der aerodynamischen Seitenkraft und des Giermoments in Abhängigkeit der Anregungsfrequenz aus einem Windkanalversuch mit Böengenerator bei einer Anströmgeschwindigkeit von 160 km/h [90]. Zudem zeigen Messungen bei instationärer Anströmung teilweise eine Erhöhung der aerodynamischen Beiwerte in Längs- und Vertikalrichtung [25].

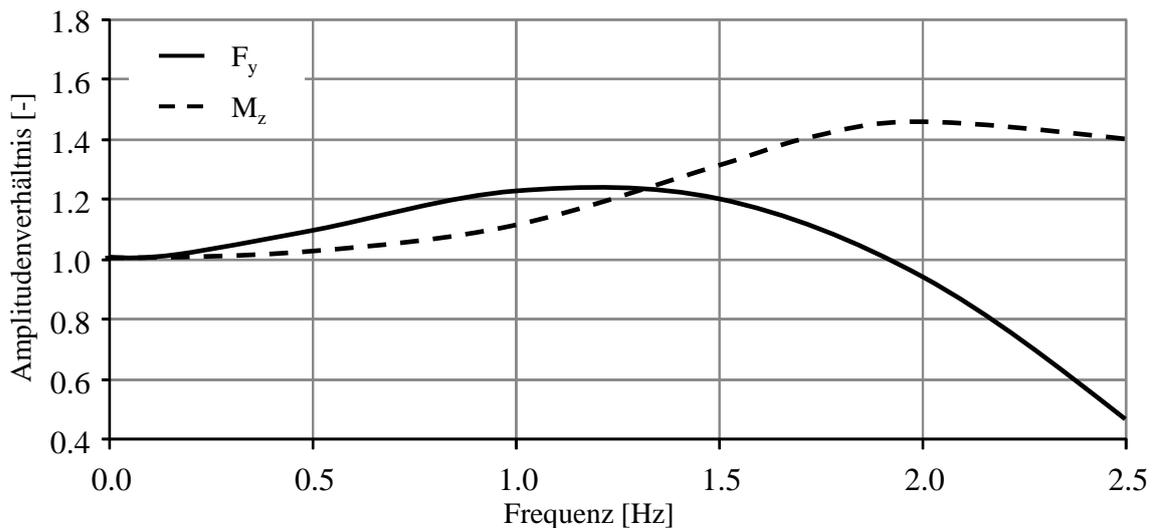


Abbildung 2.8.: Überhöhung der aerodynamischen Seitenkraft und des Giermoments in Abhängigkeit der Anregungsfrequenz bei  $v_{wind} = 160$  km/h nach [90]

Darüberhinaus werden Windkanalversuche zur Abbildung von Überholvorgängen und Vorbeifahrten realisiert. Dabei werden Überholvorgänge von Kraftfahrzeugen [67, 121, 141] sowie Vorbeifahrten an statischen Streckengegebenheiten wie Brückenpfeilern [4, 23, 133, 135] dargestellt. Hierbei werden die Effekte bei Überholvorgängen und Vorbeifahrten von Personenkraftwagen als auch Lastkraftwagen dargestellt. Im Zuge der hierbei auftretenden instationären, aerodynamischen Anregungen der Personenkraftwagen können Überhöhungseffekte der aerodynamischen Kräfte und Momente an den Kraftfahrzeugen festgestellt werden.

Je nach Anwendungsfall und geforderter Genauigkeit werden zur Ermittlung aerodynamischer Anregungsgrößen auch numerische Verfahren genutzt. Die numerischen Verfahren basieren dabei auf den Navier-Stokes-Gleichungen zur Beschreibung der Strömung newtonscher Gase. Größtenteils finden zur Bestimmung der aerodynamischen Anregungsgrößen in der Automobilindustrie nichtlineare Verfahren wie z.B. RANS, LES, DNS, DES, und Lattice-Boltzmann Anwendung. Unter [1] ist eine Übersicht der Methoden der numerischen Strömungsmechanik mit einer Gegenüberstellung von Vor- und Nachteilen aufgezeigt.

Zur Umsetzung der numerischen Simulation wird eine Diskretisierung der Fahrzeugoberfläche vorgenommen. Je nach Zielsetzung der Simulationsergebnisse können die Simulationen an stilisierten Prinzipkörpern beziehungsweise an detaillierten Netzkörpern inklusive der Abbildung der Fahrzeuginnendurchströmung erfolgen.

Die CFD-Simulation bietet vor allem die Möglichkeit, Relativaussagen zu resultierenden aerodynamischen Anregungsgrößen zu treffen [96]. Dabei können Stellhebel der Fahrzeugform zur Beeinflussung der aerodynamischen Anregungsgrößen effizient ermittelt werden [81]. Aus den ermittelten Einflussparametern können Hinweise bezüglich der Formenausprägung der Fahrzeuge abgeleitet werden. Die Validierung der Berechnung von aerodynamischen Anregungsgrößen bei stationärer Anströmung mittels CFD-Simulationen mit Messungen im Windkanal zeigt eine gute Übereinstimmung bei der Ableitung von Relativaussagen [147].

Darüberhinaus werden CFD-Simulationen genutzt, um instationäre Phänomene mit komplexen Fahrzeugmodellen zu untersuchen und somit Charakteristika instationärer Phänomene zu ermitteln [161, 190]. In der CFD-Simulation zeigt sich, dass Kraft- und Momentenverläufe von instationären Anregungen im Vergleich zu transienten und somit quasi-stationären Anregungen gleicher Anströmwinkel  $\tau$  unterschiedlich sind. Diverse Veröffentlichungen zeigen dabei Unterschiede in der Amplitudenzusammensetzung sowie in der zeitlichen Zusammensetzung der aerodynamischen Kräfte und Momente instationärer Seitenwindböen im Vergleich zu quasi-stationären, transienten Anregungen [88, 160, 168]. Eine Böenanregung mit einer Änderung des Anströmwinkels  $\nu$  um die Nickachse zeigt eine Überhöhung der Auftriebskräfte durch instationäre Effekte im Vergleich zu einer transienten Böenanregung [167]. Zudem wurden durch Simulationen einer Hubbewegung des Fahrzeugaufbaus eine Überhöhung der Änderung der Auftriebskräfte festgestellt [6, 82]. Simulative Ansätze bei der Untersuchung von Überholmanövern und Vorbeifahrten beschreiben die instationären Zeitverläufe der resultierenden Kräfte und Momente an den Fahrzeugen [20, 29, 123, 172, 186]. Nach der Beschreibung der aerodynamischen Kräfte und Momente von Personenkraftwagen wird im Folgenden auf die Ermittlung der resultierenden Fahrzeugreaktion eingegangen.

## 2.3. Fahrzeugreaktion bei Seitenwind

Ziel der Grundausslegung des Fahrwerks ist es, in der frühen Phase der Fahrzeugentwicklung Fahrwerkskonzepte und Fahrwerksparameter entsprechend dem Kundenanspruch an Fahrdynamik und Fahrkomfort zu gestalten. Herausforderung hierbei ist eine stimmige Ausprägung der Fahrzeugeigenschaften entsprechend den Zielspinnenkriterien der Fahrdynamik unter Vorgaben der Fahrzeugarchitektur wie z.B. den Gesamtfahrzeuggenen [15]. Abbildung 2.9 zeigt exemplarisch ein Zielspinnendiagramm der Fahrzeugeigenschaften des Geradeauslaufs nach [61].

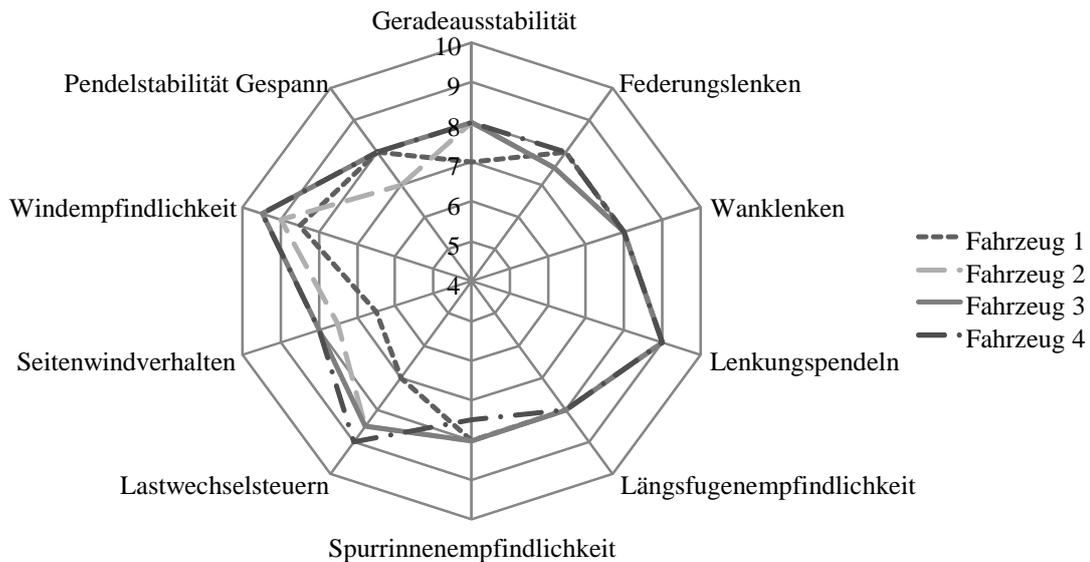


Abbildung 2.9.: Zielspinnenkriterien des Geradeauslaufs nach [61]

Die Auslegungsparameter unterliegen in der frühen Phase der Entwicklung einer gewissen Unschärfe, da durch Erkenntnisse anderer Teildisziplinen zu einem späteren Zeitpunkt der Fahrzeugentwicklung Änderungen resultieren können. Zur Ausprägung der Seitenwindempfindlichkeit, als ein Zielspinnenkriterium der Fahrdynamik [193], ist ein kundenwertes Führungs- und Störungsverhalten des Fahrzeugs zu realisieren. Die Auslegung des Fahrwerks wird durch simulative Herangehensweisen sowie durch Untersuchungen im Fahrversuch ermöglicht.

### 2.3.1. Berechnung der Fahrzeugreaktion

Um die Fahrzeugbewegung unter Seitenwind zu beschreiben, wird die translatorische und rotatorische Bewegung des Fahrzeugaufbaus ermittelt. Zur Beschreibung der translatorischen Bewegung werden meist die Beschleunigungsgrößen und zur Beschreibung der rotatorischen Bewegung die Rotationsgeschwindigkeiten genutzt. Dies liegt in den Fähigkeiten des Menschen begründet, Bewegungsgrößen über das Vestibulärsystem wahrzunehmen. Der Mensch ist in der Lage translatorischen Beschleunigungs- und rotatorische Geschwindigkeitsgrößen durch das physische Gleichgewichtssystem aufzulösen. Zur Beschreibung der Fahrzeugbewegung sind in der folgenden Abbildung 2.10 die translatorischen und rotatorischen Bewegungsgrößen des Fahrzeuges für die sechs Freiheitsgrade dargestellt.

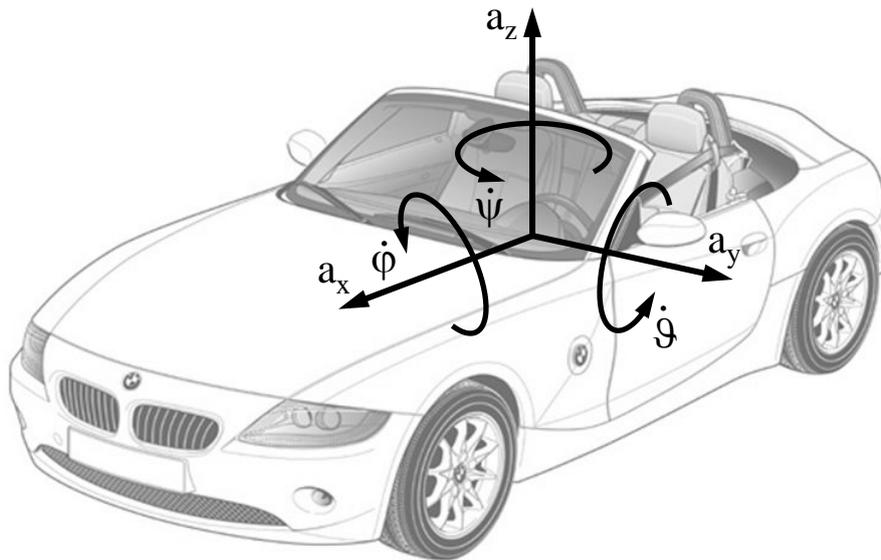


Abbildung 2.10.: Darstellung der Bewegungsgrößen des Fahrzeugaufbaus

Zur Abbildung der Dynamik von Kraftfahrzeugen gibt es diverse Ansätze, die je nach Zielsetzung, vorhandener Datenbasis zur Parametrierung und Anforderungen an Genauigkeit der Ergebnisse Anwendung finden. Die dazu genutzten Modellierungsverfahren unterscheiden sich im Detaillierungsgrad und den abgebildeten Freiheitsgraden. Dies reicht von einer einfachen Einspurmodellierung mit zwei Freiheitsgraden bis hin zum detaillierten Mehrkörpermodell mit einer Abbildung elastischer Bauteile durch Methoden der finiten Elemente. In [139] ist eine Übersicht der Simulationsmethoden zur Abbildung der Fahrzeugdynamik aufgezeigt. Im Folgenden wird eine Auswahl der relevanten Berechnungsansätze zur Bestimmung des Fahrzeugverhaltens bei aerodynamischer Anregung erläutert.

Die einfachste Abbildung der Fahrzeugdynamik erfolgt durch das klassische Einspurmodell nach [132]. Diverse Arbeiten nutzen das Einspurmodell für die Untersuchung des Seitenwindverhaltens von Personenkraftwagen [13, 21, 99, 138]. Zur Realisierung des Einspurmodells wird der Schwerpunkt des Fahrzeugs auf Fahrbahnhöhe angenommen und die resultierenden Kräfte der zwei Spuren eines Kraftwagens in der Horizontalebene zu einer Spur zusammengefasst. Durch die Abbildung können die beiden Freiheitsgrade der Giergeschwindigkeit und des Schwimmwinkels des Fahrzeugmodells bestimmt werden.

Das Fahrzeug bewegt sich dabei mit der Geschwindigkeit  $v_{Fzg}$  um den Momentanpol MP. Die Längsachse des Fahrzeugs ist um den Gierwinkel  $\psi$  um die Ausgangslage gedreht. Über den Lenkwinkel  $\delta_L$  wird der Einschlagwinkel der Vorderräder  $\delta_v$  vorgegeben. Die Geschwindigkeitsvektoren an Vorder- und Hinterachse ergeben mit der Längsrichtung der Reifen den Schräglaufwinkel  $\alpha_v$  an der Vorderachse und  $\alpha_h$  an der Hinterachse.

Aus dem Kräfte- beziehungsweise Momentengleichgewicht der zweidimensionalen Abbildung werden die Bewegungsgrößen des Fahrzeuges ermittelt. Die folgende Abbildung 2.11 zeigt eine Darstellung der kinematischen Größen des Einspurmodells nach [113]. In Abbildung 2.12 sind zudem die Kräfte an einem Einspurmodell aufgetragen.

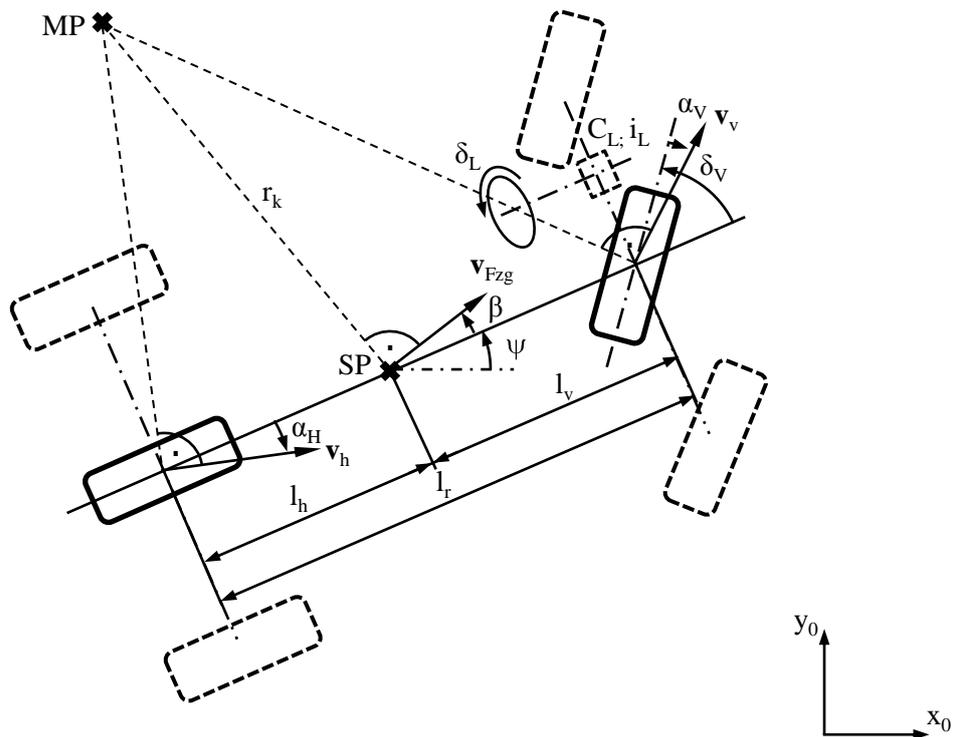


Abbildung 2.11.: Darstellung der kinematischen Kenngrößen des Einspurmodells nach [113]

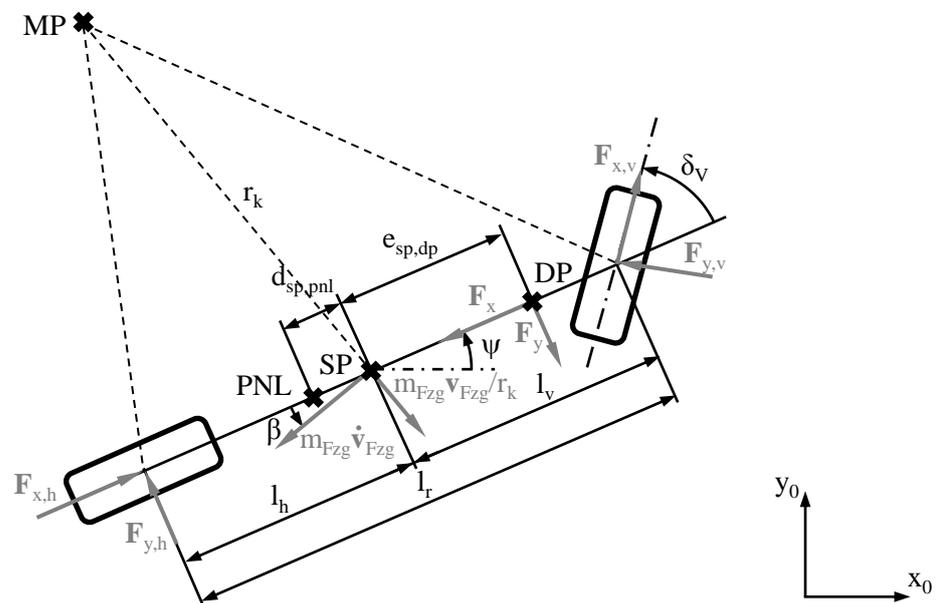


Abbildung 2.12.: Darstellung der Kräfte des Einspurmodells nach [113]

Bei der Herleitung des Einspurmodells wird die aerodynamische Anregung meist durch eine Längskraft  $F_x$  sowie Seitenkraft  $F_y$  am aerodynamischen Druckpunkt DP dargestellt. Der Abstand zwischen aerodynamischen Druckpunkt und dem Schwerpunkt des Gesamtfahrzeugs berechnet sich wie in Gleichung (2.5) beschrieben.

$$e_{sp,dp} = \frac{M_z}{F_y} \quad (2.5)$$

Diese Vereinfachung basiert auf der Annahme einer konstanten Position des aerodynamischen Druckpunktes. Dies ist bei einer stationären aerodynamischen Anregung zutreffend. Besteht eine lineare Abhängigkeit der aerodynamischen Seitenkraft und des Giermomentes vom Anströmwinkel, so gilt dies auch bei einer transienten aerodynamischen Anregung.

In [98] werden einfache analytische Gleichungen zur Beschreibung der Fahrzeugreaktion bei Anregung durch eine externe Seitenkraft auf Basis des Einspurmodells abgeleitet. Unter Betrachtung des Eigenlenkverhaltens des Fahrzeuges wird der Punkt-Neutralen-Lenkens PNL definiert. Eine Anregung des Fahrzeugs durch eine Seitenkraft am Punkt-Neutralen-Lenkens führt zu einer reinen lateralen Fahrzeugreaktion. Das Fahrzeug führt keine Gierreaktion aus. Nach folgender Gleichung (2.6) wird der Abstand des Punktes-Neutralen-Lenkens vom Schwerpunkt berechnet.

$$d_{sp,pnl} = \frac{l_h c_{\alpha h} - l_v c_{\alpha v}}{c_{\alpha v} + c_{\alpha h}} \quad (2.6)$$

Nach [113] werden die Bewegungsgleichungen des Einspurmodells aus dem Kräfte- und Momentengleichgewicht wie folgt hergeleitet.

- Kräftegleichgewicht in Fahrzeuginnenrichtung:

$$m_{Fzg} \frac{v_{Fzg}^2}{r_K} \sin\beta - m_{Fzg} \dot{v} \cos\beta + F_{x,h} - F_x + F_{x,v} \cos\delta_v - F_{y,v} \sin\delta_v = 0 \quad (2.7)$$

- Kräftegleichgewicht in Fahrzeugquerrichtung:

$$m_{Fzg} \frac{v_{Fzg}^2}{r_K} \cos\beta - m_{Fzg} \dot{v} \sin\beta - F_{y,h} - F_y - F_{x,v} \sin\delta_v - F_{y,v} \cos\delta_v = 0 \quad (2.8)$$

- Momentengleichgewicht um die Fahrzeughochachse:

$$I_{zz} \ddot{\psi} - (F_{y,v} \cos\delta_v + F_{x,v} \sin\delta_v) l_v + F_{y,h} l_h - F_y e_{sp,dp} = 0 \quad (2.9)$$

Die Querkräfte der Räder werden über die Schräglaufsteifigkeiten  $c_{\alpha v}$  und  $c_{\alpha h}$  sowie den resultierenden Schräglaufwinkel an Vorderachse nach (2.10) und Hinterachse nach (2.11) berechnet.

$$F_{y,v} = c_{\alpha v} \alpha_v \quad (2.10)$$

$$F_{y,h} = c_{\alpha h} \alpha_h \quad (2.11)$$

Die Schräglaufsteifigkeit der Achsen hängt dabei von der Reifenbeschaffenheit, Vorspur und Sturz sowie den Achslasten ab. Mit Betrachtung der Lenkung über die Lenkungssteifigkeit  $C_L$  und der Gesamtnachlaufstrecke an der Vorderachse  $n_v$  kann die Gesamtsteifigkeit der Vorderachse  $c'_{\alpha v}$  ermittelt werden (2.12).

$$\frac{1}{c'_{\alpha v}} = \frac{1}{c_{\alpha v}} + \frac{1}{C_L/n_v} \quad (2.12)$$

## 2. Stand der Technik und Zielsetzung

---

Durch das Kräftegleichgewicht in (2.7) und (2.8) sowie das Momentengleichgewicht (2.9), können mit (2.10), (2.11) und (2.12) die Bewegungsgleichungen bei konstanter Fahrzeuggeschwindigkeit wie folgt hergeleitet werden.

$$m_{Fzg}\dot{\beta} + (c'_{\alpha v} + c_{\alpha h})\beta + [m_{Fzg}v_{Fzg}^2(c_{\alpha h}l_h + c'_{\alpha v}l_v)] \frac{\dot{\psi}}{v_{Fzg}} = c'_{\alpha v}\delta_L + F_y \quad (2.13)$$

$$I_{zz}\ddot{\psi} + (c'_{\alpha v}l_v^2 + c_{\alpha h}l_h^2) \frac{\dot{\psi}}{v_{Fzg}} - c_{\alpha h}l_h + c'_{\alpha v}l_v)\beta = c'_{\alpha v}l_v\delta_L + F_y e_{sp,dp} \quad (2.14)$$

Die hier aufgezeigten Bewegungsgleichungen ermöglichen eine einfache Berechnung der Fahrzeugbewegung in der Horizontalebene sowie des Antwortverhaltens des Fahrzeuges im Frequenzbereich bei Anregung durch eine Lenkwinkelvorgabe beziehungsweise durch eine aerodynamische Anregung. Nach [139] können durch ein Einspurmodell Fahrzeugbewegungen mit einer Querbeschleunigungen in folgendem Wertebereich (2.15) abgebildet werden.

$$a_y \leq 0.4g \approx 4 \frac{m}{s^2} \quad (2.15)$$

Für Open-Loop-Manöver mit einem fixierten Lenkradwinkel  $\delta_L$  („fixed-control“) kann die ungedämpfte Giereigenfrequenz nach Gleichung (2.16) entsprechend [176] berechnet werden.

$$\omega_0^2 = \frac{mv_{Fzg}^2(c_{\alpha h}l_h - c'_{\alpha v}l_v) + c'_{\alpha v}c_{\alpha h}l^2}{I_{zz}m_{Fzg}v_{Fzg}^2} \quad (2.16)$$

Zur Berechnung der gedämpften Eigenfrequenz wird die Abklingkonstante nach Gleichung (2.17) bestimmt.

$$2\sigma_f = \frac{I_{zz}(c_{\alpha h} + c'_{\alpha v}) + m(c_{\alpha h}l_h + c'_{\alpha v}l_v)}{I_{zz}m_{Fzg}v_{Fzg}} \quad (2.17)$$

Aus der Abklingkonstante wird das Dämpfungsmaß nach Gleichung (2.18) ermittelt.

$$D_f = \frac{\sigma}{\omega_0} \quad (2.18)$$

Daraus kann die gedämpfte Giereigenfrequenz nach Gleichung (2.19) berechnet werden.

$$\omega = \omega_0 \sqrt{1 - D^2} \quad (2.19)$$

In Abbildung 2.13 wird durch Vorgabe der Parameter eines Fahrzeugs der oberen Mittelklasse und der Kenngrößen einer Reifenauswahl R1-R5 das Dämpfungsmaß (a) und die gedämpfte Eigenfrequenz (b) einer Schwingung um die Hochachse des Fahrzeuges in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit beispielhaft aufgetragen.

Das Dämpfungsmaß der Gierbewegung nimmt mit steigender Fahrzeuggeschwindigkeit ab. Die gedämpfte Giereigenfrequenz des Beispielfahrzeuges liegt bei der Betrachtung ohne Fahrereinfluss und fixiertem Lenkradwinkel hier in einem Bereich zwischen 0.35 und 0.55 Hz.

Auf Basis des Einspurmodells wird durch die sogenannte Momenten-Methode nach [110] und [103] ein Stabilitätsindex, hier STI genannt, definiert. Dabei wird das Fahrzeug Open-Loop

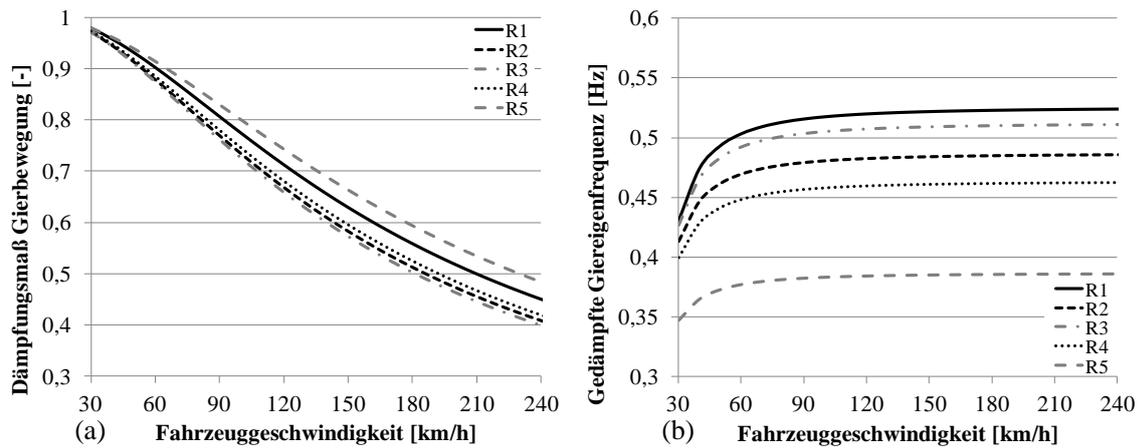


Abbildung 2.13.: Dämpfungsmaß (a) und die gedämpfte Eigenfrequenz (b) bei einer Reifenvariation R1-R5 in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit

mit einem fixierten Lenkradwinkel  $\delta_L$  („fixed-control“) betrachtet. Zur Berechnung des Stabilitätsindex wird die stabilisierenden Gierbewegung nach Gleichung (2.20) bestimmt.

$$\ddot{\psi}_{stab} = \frac{(l_v c_{\alpha v} - l_h c_{\alpha h} + e_{sp,dp} F_y)}{I_{zz}} \quad (2.20)$$

Dazu wird die Querbeschleunigung des Fahrzeugs im stationären Zustand berechnet (2.21).

$$a_{y,stat} = \frac{(F_{y,v} + F_{y,h} + F_y)}{m_{Fzg}} \quad (2.21)$$

Der Stabilitätsindex STI berechnet sich daraus wie folgt (2.22).

$$STI = \frac{\Delta \ddot{\psi}_{stab}}{\Delta a_{y,stat}} \quad (2.22)$$

Der Stabilitätsindex kann als ein Maß für die Fähigkeit des Fahrzeuges beschrieben werden, nach einer aerodynamischen Störung erneut einen stabilen Fahrzustand zu erreichen. Bei einem Stabilitätsindex  $STI < 0$  ist das Fahrzeug stets stabil.

Das beschriebene klassische Einspurmodell kann zudem erweitert werden. Zum Einen kann die Abbildung um den Einfluss der Wankbewegung des Fahrzeuges erweitert werden [87]. Dazu wird in einem vereinfachten Wankmodell das Momentengleichgewicht um die Längsachse des Fahrzeuges ermittelt [113]. Abbildung 2.14 zeigt eine Darstellung der relevanten Kräfte und Momente zur Beschreibung des Momentengleichgewichts um die Fahrzeuglängsachse bei Anregung durch eine Seitenwindanregung.

Die Kenngröße  $h_{wa,asp}$  ist dabei der Abstand zwischen Fahrzeugschwerpunkt und Wankzentrum. Durch Verschiebung der aerodynamischen Seitenkraft  $F_y$  um  $e_{ar,dp}$  nach Gleichung (2.23) resultiert die am aerodynamischen Druckpunkt angreifende Seitenkraft  $F'_y$ .

$$\sum e_{ar,dp} = \frac{M_x}{F_y} \quad (2.23)$$

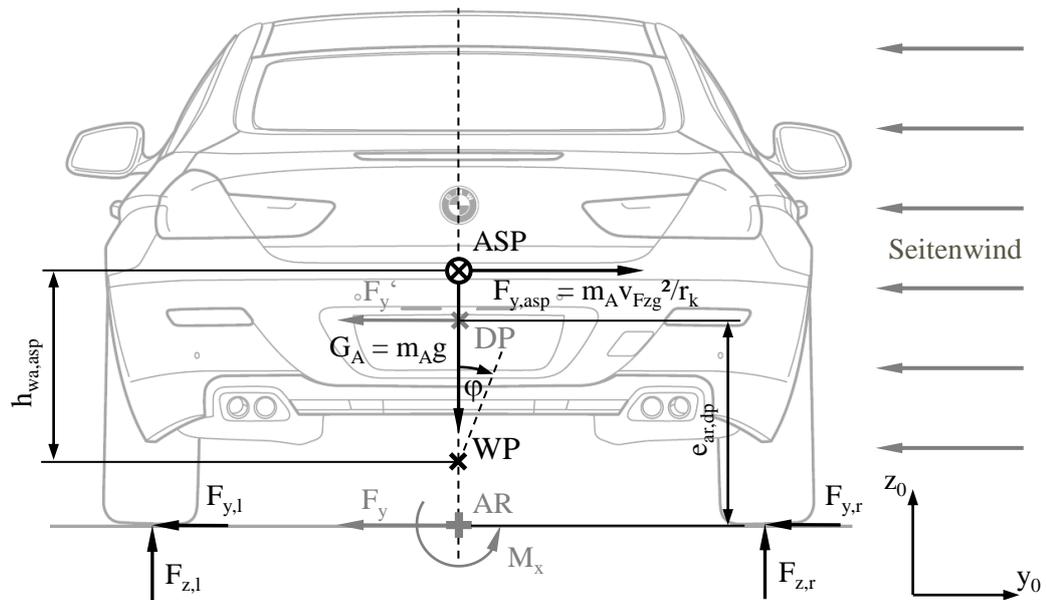


Abbildung 2.14.: Momentengleichgewicht um die Längsachse des Fahrzeugs zur Bestimmung der Wankbewegung bei aerodynamischer Anregung

Das Wankmomentengleichgewicht der äußeren Kräfte wird um das Wankzentrum des Fahrzeuges bestimmt. In Gleichung 2.24 wird die Berechnung des Momentengleichgewichts um die Fahrzeuglängsachse aufgezeigt.

$$\sum M_{x,wa} = m_A g h_{wa,asp} \varphi + m_A \frac{v_{Fzg}^2}{r_K} h_{wa,asp} - F_y \left[ \frac{M_x}{F_y} - h_{wa} \right] + l_r (F_{z,l} - F_{z,r}) + h_{wa} (F_{y,l} + F_{y,r}) \quad (2.24)$$

Durch das Wankmomentengleichgewicht wird die Abhängigkeit der Wankbewegung von der Größe des aerodynamischen Wankmoments sowie des Wankmoments der Trägheitskräfte der Fahrzeugtrajektorie deutlich [122]. Zur Bestimmung der Wankbewegung wird der Fahrzeugaufbau an der Fahrwerksaufhängung freigeschnitten und das resultierende Moment  $M_{x,C}$  (2.25) der Federkräfte aus Fahrwerksfeder und Stabilisatoren sowie das resultierende Moment  $M_{x,D}$  (2.26) der Dämpfungskräfte der Fahrwerksdämpfer eingeführt.

$$M_{x,C} = C_\varphi \varphi \quad (2.25)$$

$$M_{x,D} = D_\varphi \dot{\varphi} \quad (2.26)$$

Zur Ermittlung der Wankbewegung wird in Gleichung (2.27) der Drallsatz im Wankpol nach [53] beschrieben.

$$\frac{\mathbf{L}_{x,wa}}{dt} + [\mathbf{h}_{wa,asp} \times \mathbf{a}_{y,A}] = \sum M_{x,wa} \quad (2.27)$$

Durch Einsetzen der Gleichung des Momentengleichgewichts (2.24), der aerodynamischen Seitenkraft (2.3) und des aerodynamischen Wankmoments (2.4) im Drallsatz ergibt sich folgende Bewegungsgleichung des Wankfreiheitsgrades (2.28).

$$I_{xx,A}\ddot{\varphi} = -D_{\varphi}\dot{\varphi} + [m_A g h_{wa,asp} - C_{\varphi}] \varphi + m_A \frac{v_{Fzg}^2}{r_K} h_{wa,asp} - F_y(t) \left[ \frac{M_x(t)}{F_y(t)} - h_{wa} \right] \quad (2.28)$$

Im Sonderfall der stationären Kreisfahrt bei konstanter Windanregung kann der Wankwinkel des Fahrzeugaufbaus unter der Vorgabe  $\ddot{\varphi} = 0$  und  $\dot{\varphi} = 0$  und der Näherung  $v_{Res} = \cos(\tau_L)v_{Fzg}$  nach Gleichung 2.29 bestimmt werden.

$$\varphi = \left[ \frac{\frac{m_A}{r_K} h_{wa,asp} + \frac{\rho}{2} A_q \cos^2(\tau_L) [c_y(\tau_L) h_{wa} - c_{Mx}(\tau_L) l_s]}{C_{\varphi} - m_A g h_{wa,asp}} \right] v_{Fzg}^2 \quad (2.29)$$

Mit Berechnung des Wankwinkels kann die aus der Wankbewegung resultierende Verteilung der Radaufstandskräfte bestimmt werden. Durch Vorgabe der Radaufstandskräfte und deren Einfluss auf die Schräglauftiefe der Reifen im Einspurmodell werden die beiden Modellierungen gekoppelt [139].

Darüberhinaus kann ein Einspurmodell um eine Detaillierung der Lenkungsmodellierung [127] sowie um eine einfache Abbildung der Elasto-Kinematik der Fahrzeugachsen [91] erweitert werden. Die erweiterte Abbildung des Einspurmodells erfolgt dabei oftmals in einem Programm für Computer-Aided Control System Design (CACSD) zur Lösung der Differentialgleichungen.

Zur Bestimmung der Fahrzeugreaktion bei aerodynamischer Anregung kann zudem die Abbildung der Fahrndynamik mittels eines mathematischen Fahrzeugmodells, eines Zweispurmodells genutzt werden [149]. Hierbei wird ein Modell eines Personenkraftwagens mit den sechs Freiheitsgraden des Fahrzeugaufbaus, je nach Modellierungsansatz mit zwei bis drei DOF pro Rad und dem Freiheitsgrad der Lenkung, falls keine fixed-control Betrachtung vorliegt, dargestellt. Die Zweispurmodelle weisen somit meist eine Anzahl an Freiheitsgraden zwischen 14 und 19 DOF auf.

Die Gleichungssysteme der Ordinary-Differential-Equations (ODE) der Zweispurmodellierung werden oftmals über den Solver eines des CACSD-Programms mittels Eulerverfahren gelöst. Die Bewegungsgleichungen des Zweispurmodells werden dabei mit den Fahrzeugkenngrößen des zu untersuchenden Personenkraftwagens parametrisiert. Die Elasto-Kinematik des Fahrwerks an Vorder- und Hinterachse wird über ermittelte Kennlinien der Vorspur- und Sturzkurven in Abhängigkeit des Radhubes abgebildet. Die erforderlichen Kennlinien werden aus den Berechnungen eines Mehrkörpersimulationsprogramms oder aus Messungen an einem Prüfstand zur Vermessung der Achskinematik und Elasto-Kinematik, einem sogenannten K&C-Prüfstand ermittelt. Die Abbildung der Reifen erfolgt bei Zweispurmodellen meist über die Abbildung eines aus Prüfstandmessungen parametrisierten Reifenmodells des MF-Tyre nach [125]. In Abbildung 2.15 sind mögliche Freiheitsgrade eines Zweispurmodells dargestellt.

In der Abbildung sind die sechs Freiheitsgrade des Fahrzeugaufbaus, je ein Freiheitsgrad des Hubes und der Rotation des Rades sowie der Lenkdrrehung dargestellt. Diverse Arbeiten nutzen Zweispurmodelle zur Abbildung der Fahrzeugreaktion unter aerodynamischen Anregungen

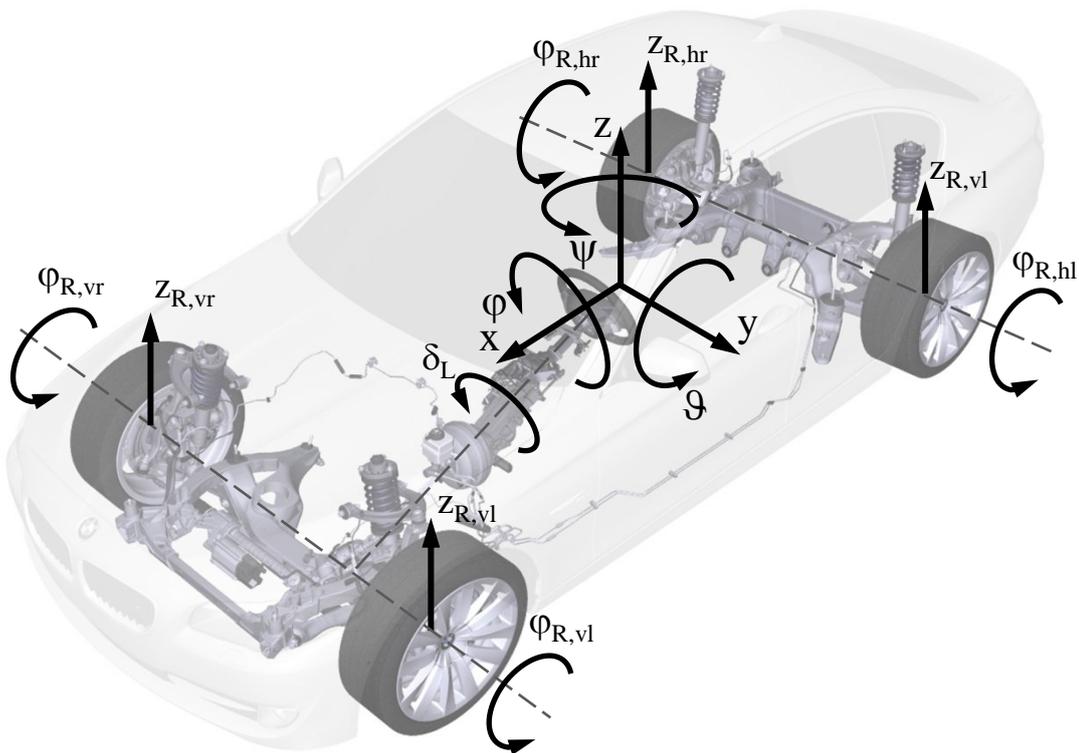


Abbildung 2.15.: Darstellung möglicher Freiheitsgrade eines Zweispurmodells

[12, 38, 174]. Gerade die kurze Berechnungsdauer der ODEs einzelner Manöver und der geringe Parametrierungsaufwand ermöglicht die Anwendung der Zweispurmodellierung zur berechnungsintensiven Bestimmung von Parametersensitivitäten oder für Untersuchungen statistischer Versuchsplanungen (DOEs).

Darüberhinaus kann die Fahrzeugreaktion auf eine aerodynamische Anregung durch die Abbildung der Fahrzeugdynamik in Mehrkörpersimulationsmodellen bestimmt werden. Die hierbei realisierte Abbildung des Fahrzeugmodells kann entsprechend der geforderten Genauigkeit und der verfügbaren Fahrzeug- und Fahrwerksparameter unterschiedlich detailliert sein [5]. Durch Finite-Elemente-Methoden (FEM) sind die Elastizitäten einzelner Fahrwerkskomponenten wie z.B. die lokalen Steifigkeiten der Achsträger zu ermitteln. Über die Kondensation von Steifigkeitsmatrizen aus der FEM-Berechnung können die Steifigkeiten der Bauteile in die Mehrkörpersimulation integriert werden.

Zur Lösung der partiellen Differentialgleichungssysteme zur Berechnung der Fahrzeugbewegung gibt es unterschiedliche numerische Ansätze der MKS-Programme [100, 118]. Die Parametrierung des Mehrkörpermodells erfolgt dabei über die Vermessung einzelner Fahrzeug- und Fahrwerksbauteile. Zum Beispiel wird über Messprüfstände die Steifigkeit des Federungssystems oder Kennlinien der verbauten Gummilager ermittelt. Die Modellierung des Reifenverhaltens wird im Rahmen der Mehrkörpersimulation durch unterschiedliche Ansätze realisiert [41]. Die Abbildung kann hierbei zum Beispiel über das aus Messungen parametrierte Reifenmodell des MF-Tyre nach [125], über ein Bürsten/Ring-Reifenmodell BRIT nach [64] oder eine auf FEM basierte Modellierung des FTyres [50] dargestellt werden.

Mehrkörpersimulationsprogramme werden in diversen Arbeiten zur Untersuchung der Fahrzeugantwort unter aerodynamischen Einflüssen genutzt [49, 73, 78, 191]. Die MKS-Modelle können vor allem zur Einflussanalyse von Kenngrößen einzelner Fahrzeugbauteile wie zum Beispiel Gummilagern genutzt werden. Nachteil der Mehrkörpersimulation ist die, im Vergleich zur Berechnung mittels des unter Abschnitt 4.2 beschriebenen Zweispurmodells, längere Berechnungsdauer einzelner Manöver sowie der höhere Aufwand für den Modellaufbau. Die Berechnungsdauer steigt dabei mit dem Abbildungsumfang elastischer Bauteile durch die Integration von Steifigkeitsmatrizen.

Zur simulativen Abbildung eines Closed-Loop-Manövers kann die Reaktion des Fahrers auf eine Abweichung des Fahrzeuges von der Solltrajektorie durch einen regelungstechnischen Ansatz dargestellt werden. Hierbei bestehen diverse Ansätze zur Abbildung des regelnden Eingriffs zur Querführung des Fahrzeuges durch den Fahrer [45, 106]. In Gleichung (2.30) ist eine Übertragungsfunktion für das Querregelverhalten des Fahrers  $M_R$  mit Betrachtung der Vorausschau nach dem sogenannten „Präzisionsmodell“ [113] aufgeführt.

$$M_R^* = M_R e^{sT_P} = V_M \frac{1 + T_D s}{1 + T_I s} e^{s(T_P - T_0)} \quad (2.30)$$

Dabei ist  $T_0$  die Totzeit des Fahrerreglers. Aus Versuchen im dynamischen Fahrsimulator wird im Falle eines Lenkungseingriffs des Fahrers eine Reaktionszeit zwischen 0.30 s und 0.60 s auf eine aerodynamische Störung abgeleitet [180]. Aus Realversuchen wurde hauptsächlich eine Reaktionszeit zwischen 0.14 und 0.20 s für einen Querregelungseingriff des Fahrers über die Lenkung gemessen [14]. In [169] werden ähnliche Reaktionszeiten zwischen 0.2 und 0.35 bei Versuchen an einer Seitenwindanlage ermittelt. Eine Altersabhängigkeit oder ein Gewöhnungseffekt lässt sich bei der Totzeit der Fahrerregelung nicht feststellen. Die Werte des Verstärkungsfaktors  $V_M$ , der Vorhaltkonstante  $T_D$  und Verzögerungskonstante  $T_I$  können jedoch je nach Fahrer deutlich unterschiedlich sein. Dies belegt vorhandene Unterschiede in der Fähigkeit der Fahrzeuglenker Abweichungen des Fahrzeuges von der Solltrajektorie auszuregeln [52].

Durch die beschriebenen Ansätze zur Modellierung der Fahrzeugdynamik ist es möglich, die Fahrzeugreaktion unter aerodynamischen Einflüssen abzubilden. Im Folgenden werden die in der Literatur dokumentierten Erkenntnisse zum Einfluss von Systemgrößen wie z.B. Fahrzeug- und Fahrwerksparameter auf die Fahrzeugreaktion bei aerodynamischer Anregungen aufgezeigt.

### 2.3.2. Einfluss von Fahrzeug- und Fahrwerkparameter

Neben der Beschreibung der aerodynamischen Anregungen und der Ermittlung der Fahrzeugreaktion gilt es, die relevanten Fahrzeug- und Fahrwerkparameter zur Beeinflussung des Seitenwindverhaltens von Personenkraftwagen zu betrachten. In der Literatur sind diverse Erkenntnisse zur Einflussgröße von Fahrzeug und Fahrwerkskenngrößen auf das Seitenwindverhalten festgehalten. Die hierbei ermittelten Abhängigkeiten leiten sich aus Erfahrungswissen des Fahrversuchs sowie simulativen Untersuchungen ab. Dabei unterscheiden sich die Untersuchungen bezüglich der betrachteten aerodynamischen Anregung, den untersuchten Fahrzeug- und Fahrwerksarchitekturen sowie den genutzten objektiven Bewertungskriterien der Fahrzeugantwort.

## 2. Stand der Technik und Zielsetzung

Da in der Literatur kein übergreifend vergleichbares, objektives Maß zur Bewertung der Einflussgröße von Fahrzeug- oder Fahrwerkparametern auf das Seitenwindverhalten existiert, ist die folgende Einstufung rein qualitativ aus den jeweiligen Beschreibungen abgeleitet. Zur Beschreibung der Einflussgröße wird hierbei ein Bewertungskriterium mit den Abstufungen „gering“, „mittel“ und „hoch“ genutzt. Darüberhinaus sind die in der Literatur betrachteten aerodynamischen Anregungsarten zu unterscheiden. Die nachfolgende Tabelle 2.3 zeigt eine Auswahl der in der Literatur beschriebenen Einflussgrößen von Fahrzeug- und Fahrwerkparameter.

Versuchsart	Methodik	Anregungsart	Einfluss Fahrzeugparameter			Quelle
			gering	mittel	hoch	
Open-Loop fixed control	Einspurmodell	stationäre Anregung	-	$C_L, c_{\alpha i}, I_{zz}$	$m_{h/v}$	[21]
			$D_{\varphi,v}, C_{\varphi,v}$		$D_{\varphi,h}, C_{\varphi,h}$	[122]
		stochastische Windanregung	$n_{R,v}, h_{wa,i}$	$D_{\varphi}$	$m_{h/v}, h_{sp}, C_{\varphi}$	[124]
		stochastische Windanregung	$m_{Fzg}, I_{zz}, c_{\alpha v}$	$e_{sp,dp}, c_{\alpha h}$	$m_{h/v}, l_r$	[173]
	Zweispurmodell	stationäre Anregung	-	-	$c_{\alpha i}, m_{h/v}$	[114]
Closed-Loop	Einspurmodell	stochastische Windanregung	$c_{\alpha v}, h_{wa,i}, C_L, D_{\varphi}$	$n_{R,v}$	$m_{h/v}, h_{sp}, C_{\varphi}$	[124]
		stochastische Windanregung	-	$c_{\alpha}$	$m_{h/v}, e_{sp,dp}$	[113]
		stochastische Windanregung	$e_{sp,dp}, c_{\alpha v}, c_y, I_{zz}$	-	$c_{\alpha h}, m_{h/v}, l_r$	[173]
	Fahrversuch	Seitenwindanlage	$C_{\varphi}$	-	$e_{sp,dp}, m_{h/v}$	[99]
		natürlicher Seitenwind	-	-	$c_{\alpha i}$	[170]

Tabelle 2.3.: Auswahl in der Literatur beschriebener Einflussgrößen von Fahrzeug- und Fahrwerkparametern auf das Seitenwindverhalten

Betrachtet man die hier aufgezeigten Einflussgrößen, so werden die Achslastverteilung, der Abstand des aerodynamischen Druckpunktes vom Schwerpunkt und somit vom Punkt-Neutralen Lenkens sowie die Schräglaufsteifigkeit des Reifens als wichtige Einflussgrößen identifiziert. Darüberhinaus wird ein deutlicher Einfluss geometrischer Größen wie Spurweite, Höhe des Schwerpunkts oder Höhe der Wankachse beschrieben. Auch wird der Einfluss der Gierträgheit, der Wankdämpfung und der Wanksteifigkeit genannt. Bei einer Closed-Loop-Betrachtung kom-

men Parameter der Lenkung wie die Lenkungssteifigkeit  $C_L$  hinzu. Eine gesamthafte Analyse der Einflussgröße von Fahrzeug- und Fahrwerkskenngrößen für unterschiedliche Arten der aerodynamischen Anregung zur quantifizierten Gegenüberstellung der Einflussgröße als Stellhebelanalyse ist nicht bekannt.

Neben dem Einfluss von Fahrzeug- und Fahrwerksparametern wird das Fahrverhalten von Personenkraftwagen zudem deutlich durch den Verbau eines Anhängers beeinflusst [112]. Für das aerodynamische Störungsverhalten des Fahrzeuggespanns sind die Parameter des Schwingungssystems PKW-Anhängerzug ausschlaggebend [194]. Bei hohen Fahrgeschwindigkeiten kann es durch eine aerodynamische Anregung zu einem kritischen Aufschwingen des Fahrzeuggespanns kommen.

### 2.3.3. Einfluss aktiver, mechatronischer Systeme

Neben den passiven Fahrwerks- und Fahrzeugparametern beeinflussen mechatronische Systeme das Fahrverhalten maßgeblich [76]. Sensoren und Aktuatoren werden genutzt, um über Vorsteuerungs- beziehungsweise Regelungsansätze das Seitenwindverhalten von Kraftfahrzeugen gezielt zu verbessern. Da derzeitige Personenkraftwagen in der Regel über keine explizite Sensorik zur Seitenwindmessung verfügen, wird die Regelung meist über einen Schätzer der Seitenwindanregung realisiert. Dabei wird durch Berechnung der Gleichungen eines einfachen Einspurmodells die Solltrajektorie entsprechend der Lenkwinkleingabe bestimmt. Über den Vergleich mit den aus der Sensorik gemessenen Werten der Gier- beziehungsweise der Querschleunigung des Fahrzeuges wird die aerodynamische Anregung abgeschätzt [51].

Zur Beeinflussung der Fahrzeugantwort werden unterschiedliche aktive Systeme angesteuert. Zum Einen gibt es Ansätze die Fahrzeugreaktion auf Seitenwind über radindividuelle beziehungsweise achsindividuelle Bremsenriffe zu beeinflussen [10, 11]. Dies kann mittels eines aktiven Bremssystems wie einem Dynamic Stability Control (DSC) realisiert werden. Als weiteres Aktuatorprinzip zur Beeinflussung der Fahrzeugreaktion bei Seitenwind werden elektrohydraulische, aktive Feder-Dämpfersysteme genutzt [2, 131]. Dabei wird mittels einer Verstellung des Feder-Dämpfer-Systems bei Seitenwindanregung eine dynamische Radlaständerung realisiert, die der Fahrzeugreaktion entgegengewirkt.

Darüberhinaus kann die Fahrzeugantwort über den Querführungseingriff eines aktiven Lenksystems an der Vorderachse erfolgen [18, 79, 83, 136, 187]. Durch den Regeleingriff über ein Lenksystem lässt sich eine deutliche Verbesserung der Fahrzeugantwort auf aerodynamische Anregungen realisieren. Weitere Ansätze beziehen die Sensorik der Fahrerassistenz, wie z.B. eine Monokamera, in die Ausregelung einer Seitenwindstörung mit ein [159]. Zudem gibt es Regelungsansätze zur Beeinflussung der Fahrzeugantwort durch eine Allradlenkung [151, 192]. Die Allradlenkung zeigt dabei vor allem bei höheren Fahrzeuggeschwindigkeiten eine bessere Ausregelung von Seitenwindstörungen als der Regeleingriff über die reine Vorderachslenkung [77]. Der Regeleingriff durch ein Lenkungssystem an der Hinterachse (HSR) ermöglicht nur teilweise die Kompensation der Fahrzeugreaktion [165].

Alle Regelungsansätze die auf einer Abschätzung des Seitenwinds aus der Fahrzeugbewegung basieren, können jedoch erst ab einer Identifikationsschwelle der Seitenwinderkennung die Fahrzeugreaktion beeinflussen. Die notwendige Identifikationsschwelle, die Latenzzeiten der

Funktionslogik sowie die Reaktionszeiten des Aktuators limitieren aufgrund der Phasenlage von Anregung und Regelgröße die Güte der Ausregelung aerodynamischer Seitenwindanregungen. Die hierbei erforderliche Dynamik des Regeleingriffs führt meist zu einem Überschwingen der Fahrzeugbewegung. Gerade kurzzeitige, impulsartige Seitenwindböen können mittels den bestehenden mechatronischen Systemen nur teilweise kompensiert werden.

Neben den hier beschriebenen, mechatronischen Systemen zur Beeinflussung des Fahrwerks werden auch aktive aerodynamische Systeme realisiert. Durch verstellbare Spoilersysteme am Fahrzeugheck oder Staulippen an der Fahrzeugfrontschürze [108] können die Auftriebskräfte des Personenkraftwagens aktiv gestellt werden. Im Bereich des Motorsports werden darüberhinaus aerodynamische Systeme zur Regelung der Auftriebsbeiwerte realisiert [37]. Zudem bestehen Ansätze durch Active Flow Control (AFC) den Giermomentenverlauf am Fahrzeug durch einen Regeleingriff zu beeinflussen [129].

### 2.3.4. Einfluss des Fahrers

Im Rahmen der Closed-Loop Betrachtung des Systems Fahrer-Fahrzeug unter dem Einfluss aerodynamischer Anregungen hat der Fahrzeuglenker einen deutlichen Einfluss auf das Antwortverhalten des Personenkraftwagens. Das Zusammenspiel des Führungs- und Störungsverhaltens durch die subjektive Wahrnehmung des Fahrers und die daraus resultierende Fahrzeugreaktion wurde detailliert untersucht [14, 89, 173, 174]. Der Fahrer versucht durch einen Lenkeingriff die Spurabweichung einer Seitenwindanregung zu kompensieren. Hierbei wird eine mögliche Verstärkung der Fahrzeugreaktion durch den Regelungseingriff des Fahrers aufgezeigt [141]. Der Einfluss auf die Fahrzeugbewegung unter Seitenwind hängt dabei vom Frequenzbereich der Anregung ab. Die folgende Tabelle 2.4 nach [138] beschreibt den regelnden Fahrereinfluss in Abhängigkeit des Frequenzbereichs der aerodynamischen Anregung.

<b>Frequenzbereich Untergrenze [Hz]</b>	<b>Frequenzbereich Obergrenze [Hz]</b>	<b>Fahrereinfluss</b>
-	0.4 - 0.6	Fahrer kann Störungen sehr gut ausregeln
0.4 - 0.6	0.8 - 1.0	Fahrer verstärkt Fahrzeugreaktion
0.8 - 1	2.0	Fahrereinfluss nimmt merklich ab
2.0	-	Fahrer reagiert nicht mehr auf Störungen

Tabelle 2.4.: Regeleinfluss des Fahrers in Abhängigkeit der Anregungsfrequenz nach [138, 141]

Der hier beschriebene Frequenzbereich des verstärkenden Fahrereinflusses deckt sich mit dem in [173] aufgezeigten Bereich von 0.5 - 2.0 Hz. Aus der Tabelle lässt sich ein Frequenzbereich von 0.4 - 1.0 Hz der aerodynamischen Anregung ablesen, in dem der regelnde Einfluss des Fahrers die Fahrzeugantwort deutlich verstärkt. Die Güte der Spurhaltung bei aerodynamischer Anregungen hängt dabei von den Fähigkeiten des Fahrzeuglenkers ab [52, 119, 148]. Zudem wird die Einflussgröße des Fahrzeuglenkers durch den Zustand des Fahrers beeinflusst. Es ist festzustellen, dass der verstärkende Regeleingriff des Fahrers auf die Abweichung des Fahrzeuges von

der Solltrajektorie unter Seitenwind durch Einflüsse wie Ermüdung oder kognitive Belastung des Fahrzeuglenkers interessanterweise verringert wird [44, 59, 60].

## 2.4. Fahrversuch zur Beurteilung des Seitenwindverhaltens

Zur Auslegung der Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen sind diverse Fahrmanöver zur Bewertung einzelner Zielspinneneigenschaften im Fahrversuch beschrieben. Unter [134] ist eine Übersicht der bestehenden Testverfahren aufgezeigt. Zur Dokumentation der subjektiven Wahrnehmung des Fahrverhaltens im Versuch dient meist ein zehn-stelliges System zur Beschreibung eines Bewertungsindex BI der Fahrzeugeigenschaften [61]. Die durchgeführten Versuche der Geradeausfahrt zur Bewertung des Seitenwindverhaltens können dabei in Versuche zum Störungsverhalten und zum Führungsverhalten der Personenkraftwagen unterteilt werden.

Zur Bewertung des Störungsverhaltens kann zum Einen auf die Bewertungskriterien des Geradeauslaufs, auch Richtungsstabilität genannt, zurückgegriffen werden. Zwar ist per Definition der Geradeauslauf von Fahrzeugen nur bei Windstille beziehungsweise geringen Windanregungen zu bewerten, doch ist in der subjektiven Wahrnehmung durch den Fahrer der Geradeauslauf nur schwer vom Seitenwindverhalten zu trennen. Ursächlich für Abweichungen von der Solltrajektorie sind hierbei beispielsweise Unebenheiten der Fahrbahn oder konzeptbedingte Eigenschaften des Fahrwerks. Die in den Untersuchungen unter [34, 35, 40, 42] aufgezeigten Bewertungskriterien sowie versuchstechnischen Methoden zum Geradeauslauf können teilweise auf die Bewertung des Störungsverhaltens übertragen werden.

### 2.4.1. Erprobung Seitenwindverhalten im Realversuch

Nach [61] wird zur Bewertung im Realversuch das „Seitenwindverhalten“ und die „Windempfindlichkeit“ unterschieden. Zur Bewertung des Seitenwindverhaltens werden Versuchsfahrten unter Seitenwind, mit konstanter Fahrgeschwindigkeit, bei gerader Streckenführung z.B. im realen Straßenverkehr auf Autobahnen bei trockenen Witterungsbedingungen empfohlen. Auftretende Abweichungen von der Solltrajektorie sowie Richtungsänderungen aufgrund von aerodynamischen Anregungen dienen als Kriterien zur Bewertung des Seitenwindverhaltens. Zudem hat der notwendige Lenkaufwand zur Spurhaltung Einfluss auf die Bewertung des Fahrzeugverhaltens. Die Randbedingungen der empfohlenen Fahrversuche sind jedoch unter natürlichen Windbedingungen nur zum Teil reproduzierbar. Zwar kann die Anregung während der Versuchsfahrt wie unter Abschnitt 2.2.1 beschrieben messtechnisch erfasst werden, doch haben Vergleichsfahrten mehrerer Fahrzeuge aufgrund der stochastischen Natur der Anregung nur eine limitierte Aussagefähigkeit. Zudem sind die natürlichen Windbedingungen oftmals jahreszeitabhängig und Versuchsfahrten somit nicht ganzjährig durchführbar. Die folgende Abbildung 2.16 zeigt beispielhaft einen geraden, windexponierten Autobahnabschnitt zur Erprobung des Seitenwindverhaltens.

Die Bewertung der Windempfindlichkeit im Fahrversuch erfolgt durch Vorbeifahrten beziehungsweise Überholmanöver an anderen Kraftfahrzeugen z.B. Nutzkraftwagen. Durch Passieren des identischen Fahrzeuges unter gleichen Randbedingungen ist eine gute Reproduzierbarkeit



Abbildung 2.16.: Windexponierter Autobahnabschnitt zur Seitenwinderprobung im Realversuch

der aerodynamischen Anregung und somit der Bewertung des Fahrzeugverhaltens realisierbar. Zur Definition einer subjektiven Bewertung der Windempfindlichkeit werden jedoch Versuchsfahrten über längere Distanzen  $> 30\text{km}$  auf geraden Autobahnabschnitten empfohlen. Die Bewertung erfolgt hierbei über den Gesamteindruck des Fahrzeugverhaltens bei Anregung durch Wirbelschleppen anderer Verkehrsteilnehmer. Aufgrund der wechselnden Randbedingungen ist auch hierbei eine genaue Reproduzierbarkeit nur bedingt möglich.

### 2.4.2. Erprobung Seitenwindverhalten an einer Seitenwindanlage

Zur Bewertung des Störungsverhaltens unter Seitenwind werden zudem Versuche bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage nach der Norm DIN/ISO 12021-1 [74] durchgeführt. Diese erfolgen sowohl in einer Open-Loop- als auch Closed-Loop-Betrachtung. Dabei wird ein Fahrzeug mit konstanter Geschwindigkeit an zur Fahrstrecke quer positionierten Ventilatoren vorbeigeführt. Die Fahrzeugreaktion wird über ein Beschleunigungskreiselsystem gemessen. Hierbei wird eine Fahrgeschwindigkeit von  $140\text{km/h}$  und eine Strömungsgeschwindigkeit der Ventilatoren von  $80\text{km/h}$  zur besseren Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse empfohlen.

Die Anregungsgröße der Seitenwindanlage weist somit im Vergleich mit natürlich auftretenden, durchschnittlichen Anregungsgrößen eine deutlich höhere Anströmgeschwindigkeit auf. Die Anregung durch die Seitenwindanlage entspricht dabei eher einer Größenordnung von Starkwinden. Somit stellt sich die Frage, ob die Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage zur Bewertung der subjektiven Wahrnehmung von Seitenwindstörungen repräsentativ ist. Es gilt somit den Nutzen einer Seitenwindanlage für die Grundausslegung des Seitenwindverhaltens von Personenkraftwagen zu bewerten. Abbildung 2.17 zeigt die Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage.

Nachteil an der Überprüfung des Seitenwindhaltens im realen Fahrversuch ist, dass diese erst nach Fertigung eines Versuchsträgers durchgeführt werden kann. Zur Ableitung robuster Aus-



Abbildung 2.17.: Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage

sagen zum Seitenwindverhalten muss der Versuchsträger einen entsprechenden Reifegrad der aerodynamischen Ausprägung des Fahrzeuges aufweisen. Dazu ist ein Versuchsträger mit einem seriennahen Stand des Designs der Fahrzeugaußenhaut erforderlich. Die Fahrversuche können somit effektiv erst zu einem späteren Zeitpunkt der Fahrzeugentwicklung durchgeführt werden.

## 2.5. Objektivierung der Subjektivwahrnehmung der Seitenwindreaktion

Aus den ermittelten Antwortgrößen der Fahrzeugdynamik und der subjektiven Bewertung des Seitenwindverhaltens im Fahrversuch sind objektive Kenngrößen, sogenannte CVs, zur Beschreibung der Subjektivwahrnehmung des Fahrers abzuleiten. Die subjektive Wahrnehmung wird über visuelle, vestibuläre, propriozeptive und taktile, insbesondere haptische Eindrücke über den Kontakt der Hände zum Lenkrad oder dem Körperkontakt zum Fahrersitz beeinflusst. Darüberhinaus kann auch die auditive Wahrnehmung z.B. der Aeroakustik einer Seitenwindanregung in die subjektive Bewertung des Fahrers einfließen [189]. Diverse Arbeiten behandeln die Korrelation objektiver Kenngrößen zur subjektiven Wahrnehmung der Fahrzeugaufbaubewegung unterschiedlicher Zielspinnenkriterien der Fahrdynamik [7, 8, 84, 188].

### 2.5.1. Wahrnehmungsschwellen der Fahrzeugbewegung

Ein Ansatz zur Untersuchung der subjektiven Wahrnehmung der Fahrzeugbewegung ist der Versuch in einem dynamischen Fahrsimulator [31, 117]. Aus Fahrsimulatorversuchen wurden visuelle und vestibuläre Wahrnehmungsschwellen der translatorischen und rotatorischen Aufbau-

## 2. Stand der Technik und Zielsetzung

bewegung abgeleitet [47, 97, 116, 137]. In Tabelle 2.5 ist eine Auswahl der in der Literatur beschriebenen Wahrnehmungsschwellen einzelner Freiheitsgrade aufgezeigt.

Wahrnehmung	Quelle	$a_x [\frac{m}{s^2}]$	$a_y [\frac{m}{s^2}]$	$a_z [\frac{m}{s^2}]$	$\dot{\varphi} [\frac{^\circ}{s}]$	$\dot{\theta} [\frac{^\circ}{s}]$	$\dot{\psi} [\frac{^\circ}{s}]$
<b>Vestibulär</b>	Hosman und v. d. Vaart [47]	0.04...0.085			-	-	-
	Benson et Al. [47]	0.063	0.057	0.154	2.04	2.07	1.20
	Mesland et Al. [47]	-	-	-	-	0.5	-
	Muragishi [116]	0.015	0.015	0.015	0.2	0.4	0.58
<b>Visuell</b>	Reid und Nahon [47]	0.17	0.17	0.28	3.0	3.6	2.6
	Reymond et al. [47]	0.05			2.04		
	Muragishi [116]	0.27	0.255	0.27	0.255	0.075	0.07
<b>Übergreifend</b>	Sammet [137] untere Schwelle	0.02	0.02	0.02	0.12	0.29	1.60
	Sammet [137] obere Schwelle	0.2	0.2	0.28	3.0	3.6	4.0

Tabelle 2.5.: Übersicht der in der Literatur aufgeführten Wahrnehmungsschwellen der Fahrzeugbewegung nach [47, 116, 137]

Betrachtet man die hier definierten Kenngrößen, so zeigt sich eine deutliche Streuung der identifizierten Wahrnehmungsschwellen. Ergänzend zu den aufgezeigten Wahrnehmungsschwellen gilt es, das Auflösungsvermögen von Unterschieden in der Fahrzeugbewegung durch den Fahrer zu betrachten. In [157] wird durch Fahrversuche eine besondere Auflösbarkeit der Gier- und der Wankbewegung durch den Fahrer nachgewiesen.

Erhält der Fahrer zusätzlich zur vestibulären, visuellen, und propriozeptiven Wahrnehmung der Aufbaubewegung auch eine taktile Rückmeldung der Fahrzeugantwort über die Lenkung, so gilt es, die Wahrnehmungsschwellen für Lenkradmomente zu betrachten. In [185] wird die Wahrnehmungsschwelle von Lenkradmomenten um die Nulllage, bei einer Handposition an der linken und rechten Seite des Lenkrads, im arithmetischen Mittel bei 0.56 Nm aufgeführt. Zudem wird hier aufgezeigt, dass 95% der Probanden ein Lenkradmoment erst ab 1.20 Nm wahrnehmen. Ein ähnlicher Bereich der Wahrnehmungsschwelle für Lenkradmomente wird in [120] aufgezeigt. Im Mittel sind die hier beschriebenen Wahrnehmungsschwellen von aufgeschalteten Zusatzlenkmomenten zwischen 0.44 und 0.58 Nm.

Die Signifikanz der einzelnen Größen der Fahrzeugantwort für die subjektive Bewertung der Fahrzeugbewegung lässt sich durch die reine Betrachtung der Wahrnehmungsschwellen und der

Wahrnehmung von Änderungen einzelner Bewegungsgrößen nicht abschließend herleiten. Zudem ist hierbei keine Aussage bezüglich der Wahrnehmungsschwellen und Bewertung kombinierter Aufbaubewegungen mehrerer Freiheitsgrade abzuleiten. Bei kombinierten Aufbaubewegungen kommt zur Ausprägung der Amplitudenwerte die zeitliche Zusammensetzung der einzelnen Bewegungsgrößen hinzu. Aus Erfahrungswerten des Fahrversuchs resultiert die Annahme, dass ein Normalfahrer einen Zeitversatz unterschiedlicher Bewegungsgrößen des Aufbaus von zirka 10 ms und ein Fahrdynamikexperte, der Abstimmungen des Fahrwerks durchführt, von zirka 5-8 ms vestibulär auflösen kann. Visuell können zeitliche Unterschiede von mindestens 20-30 ms aufgelöst werden [185]. In [187] wird die subjektive Wahrnehmung von Phasenverzügen kombinierter, sinusförmiger Nick- und Wankbewegungen aufgezeigt. Durch Probandenstudien wurde hierbei die Auflösbarkeit von Zeitverzügen zwischen der Nick- und Wankrotation des Fahrzeugaufbaus ab einem Zeitverzug von 125 ms ermittelt. Zudem zeigt sich ein Einfluss der zeitlichen Anordnung auf die subjektive Bewertung.

Die Wahrnehmung der Seitenwindanregung erfolgt zudem auditiv. In Abbildung 2.18 ist die Einflussgröße der Hauptakustikquellen im Fahrzeug in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit nach [189] aufgezeigt.

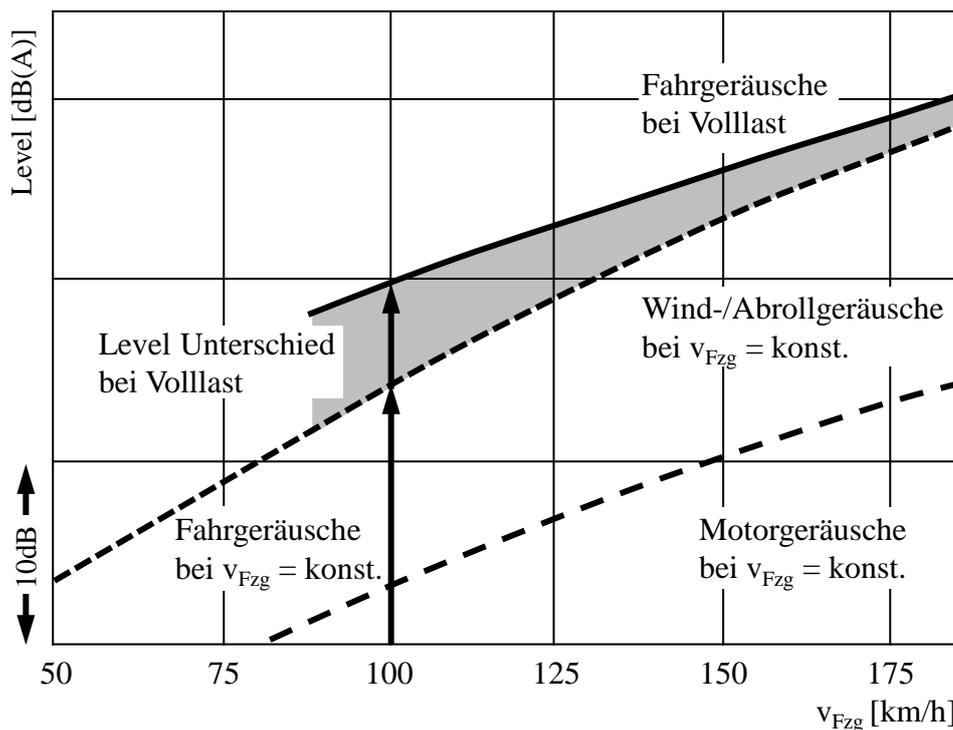


Abbildung 2.18.: Quellen akustischer Anregung im Betrieb von Personenkraftwagen nach [189]

Die am Fahrzeugaufbau resultierenden Windgeräusche sind maßgeblich für die im Innenraum wahrnehmbare Akustik. In diversen Untersuchungen wird die Wahrnehmung der Aeroakustik untersucht. Eine direkte Bewertung des Einflusses der Windgeräusche aerodynamischer Anregungen auf die subjektive Wahrnehmung des Seitenwindverhaltens ist nicht bekannt.

### 2.5.2. Charakteristische Kenngrößen der Fahrzeugantwort

Nach der Identifikation der durch den Fahrer wahrnehmbaren Kenngrößen der Fahrzeugbewegung gilt es, signifikante objektive Kenngrößen CVs zur Beschreibung der subjektiven Wahrnehmung des Seitenwindverhaltens durch den Fahrer zu ermitteln. In der Literatur sind unterschiedliche Bewertungskriterien der Fahrzeugantwort unter aerodynamischen Einflüssen dokumentiert. Aufgrund der gegebenen Reproduzierbarkeit in einem dynamischen Fahrsimulator sind hierzu diverse Ansätze zur Objektivierung des Seitenwindverhaltens dokumentiert [90, 104, 180, 181]. Zudem bestehen Erkenntnisse aus simulativen Betrachtungen und Untersuchungen im realen Fahrversuch. In den meisten Fällen ist die hierbei betrachtete Größenordnung der Seitenwindanregung im Bereich der Starkwinde. Im Folgenden wird eine Übersicht der in der Literatur beschriebenen CVs zum Seitenwindverhalten aufgeführt. Tabelle 2.6 zeigt eine Auswahl charakteristischer objektiver Kenngrößen zur Bewertung des Seitenwindverhaltens im Open-Loop Manöver. Die hierbei aufgelisteten Kennwerte unterscheiden sich jeweils nach Untersuchungsmethodik und Art der aerodynamischen Anregung.

Versuchsart	Methodik	Anregungsart	Bewertungskenngröße	Quelle
<b>Open-Loop</b>	Einspurmodell	generische Windanregung	$\Delta p_y, \dot{\psi}$	[62]
		Seitenwindanlage	$a_y, \Delta p_y, \psi, \dot{\psi}$	[136]
	Zweispurmodell	generische Windanregung	$\beta, \dot{\psi}$	[10]
	Fahrversuch	Seitenwindanlage	$a_y, \psi, \dot{\psi}$	[74]
			$\Delta p_y$	[170]
	natürlicher Seitenwind	$a_y, \Delta p_y, \dot{\psi}, \ddot{\psi}$	[54]	
<b>Open-Loop, fixed-control</b>	Einspurmodell	stationäre Anregung	$\dot{\psi}, t(max(\dot{\psi}))$	[21]
		stochastische Windanregung	$\Delta p_y, \beta, \dot{\psi}$	[124]

Tabelle 2.6.: Auswahl der in der Literatur beschriebenen objektiven Kenngrößen zur Bewertung des Seitenwindverhaltens im Open-Loop Manöver

Betrachtet man die hier aufgezeigten Kenngrößen, so werden größtenteils die Querabweichung, Quereschleunigung, der Schwimmwinkel und Gierbewegung als Bewertungskriterium der Open-Loop Manöver empfohlen. In folgender Tabelle 2.7 ist eine Auswahl an CVs zur Bewertung des Seitenwindverhaltens im Closed-Loop Manöver aufgezeigt. Auch hierbei wird die zugrunde liegende Untersuchungsmethodik und Art der aerodynamischen Anregung der jeweiligen Kenngrößen unterschieden.

Versuchsart	Methodik	Anregungsart	Bewertungskenngröße	Quelle
Closed-Loop	Einspurmodell	stochastische Windanregung	$\Delta p_y, \beta, \delta_L, \dot{\varphi}, \dot{\psi}$	[124]
		Seitenwindanlage	$a_y, \Delta p_y, \psi, \dot{\psi}$	[165]
	Fahr simulatorversuch	Seitenwindanlage	$T_{eq}, \dot{\psi}$	[181]
			$\Delta p_y, \dot{\psi}$	[104]
	Fahrversuch	Seitenschubvorrichtung	$a_y, \Delta p_y, A_R, \psi, \dot{\psi}$	[14]
			$a_y, a_{y,K}, M_L, \delta_L, \dot{\psi}$	[99]
		Seitenwindanlage	$a_y, \Delta p_y, \psi, \dot{\psi}, \ddot{\psi}$	[58]
			$a_y, \delta_L, \dot{\psi}, \ddot{\psi}$	[54]
		natürlicher Seitenwind	$\Delta p_y, \dot{\psi}$	[86]
			$a_y, \dot{\varphi}, \dot{\psi}$	[101]
			$T(\dot{\psi}_{max}), \delta_L, \dot{\psi}$	[170]
			$\Delta p_y, \psi, \dot{\psi}$	[174]
	$\delta_L, \psi, \dot{\psi}, \ddot{\psi}$	[193]		

Tabelle 2.7.: Auswahl der in der Literatur beschriebenen objektiven Kenngrößen zur Bewertung des Seitenwindverhaltens im Closed-Loop Manöver

Ergänzend zu den in Tabelle 2.6 beschriebenen Kenngrößen kommen bei der Closed-Loop Betrachtung in Tabelle 2.7 noch CVs zur Bewertung des Lenkverhaltens hinzu. Es wird die Bewertung des Lenkwinkelverlaufs, des Lenkmomentenverlaufs und der äquivalenten Verzögerungszeit  $T_{eq}$  empfohlen. Die Objektivierung der Subjektivwahrnehmung von Lenkungseigenschaften ohne Seitenwindeinfluss und die dabei abzuleitenden Auslegungskriterien der Lenkungssysteme wurden in diversen Arbeiten vorangetrieben [128, 182, 185]. Die hierbei gewonnenen Erkenntnisse der objektiven Kenngrößen zum Anlenkverhalten und zur Lenkungsrückmeldung können auf das Führungsverhalten der Kraftfahrzeuge und somit auf die Closed-Loop Betrachtungen übertragen werden. Zudem wird in [101] bei einer Anregung des Fahrzeuges durch natürlichen Seitenwind kleinerer Größenordnung im Closed-Loop Manöver die Betrachtung der Wankbewegung vorgeschlagen.

## 2. Stand der Technik und Zielsetzung

Betrachtet man die in der Literatur dokumentierten Kenngrößen, so zeigt sich eine Streuung der empfohlenen CVs zur Bewertung des Seitenwindverhaltens. Zudem ist eine Priorisierung einzelner Kenngrößen beziehungsweise eine quantifizierte Reihung der Bewegungsgrößen zum Seitenwindverhalten für den Bereich geringfügig oberhalb der Wahrnehmungsschwellen nicht dokumentiert. Eine Priorisierung der Zielgrößen ist erforderlich, um eine Optimierung von Fahrzeug- und Fahrwerksparametern unter einer Vielzahl von Zielkriterien zu realisieren.

Aus der Literatur zur Bewertung der Fahrdynamik im höheren Querdynamik-Bereich lässt sich eine Hierarchie des Einflusses einzelner Aufbaugrößen auf die Subjektivbewertung ableiten [32, 93]. Hierbei zeigt sich, dass die Querbeschleunigung des Fahrzeugaufbaus den größten Einfluss auf die Subjektivbewertung hat. Die Giergeschwindigkeit und die Wankgeschwindigkeit werden hierbei mit einem geringeren Einflussfaktor eingestuft. Diese Einstufung ist jedoch für Manöver beschrieben, die mit deutlich höheren Amplituden der Fahrzeugbewegung im Vergleich zur Seitenwindreaktion durchgeführt werden.

In der Norm ISO 2631 [75] ist die Bewertung kontinuierlicher translatorischer sowie rotatorischer Schwingungen auf einen sitzenden menschlichen Körper beschrieben. Die Norm empfiehlt dazu die Berechnung eines Effektivwertes der jeweiligen Schwingung nach Gleichung (2.31).

$$a_w = \left[ \frac{1}{T_v} \int_0^{T_v} a_w^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.31)$$

Fahrzeugschwingungen aufgrund von Seitenwind sind zur Berechnung des sog. Crest-Faktors größtenteils als stoßartige Bewegungen einzustufen. Um eine Bewertung mehr-axialer Schwingungen zu realisieren, wird die Berechnung eines Gesamteffektivwertes  $a_{wv}$  nach Gleichung (2.32) empfohlen.

$$a_{wv} = (k_x^2 a_{wx}^2 + k_y^2 a_{wy}^2 + k_z^2 a_{wz}^2)^{\frac{1}{2}} \quad (2.32)$$

Die Gewichtung der Effektivwerte einzelner Bewegungsgrößen für die Betrachtung der Sitzoberfläche erfolgt entsprechend folgender Gewichtungstabelle 2.8 nach [97].

Schwingungsart	Gewichtungsfaktor
Translation x-Achse	$k_x = 1$
Translation y-Achse	$k_y = 1$
Translation z-Achse	$k_z = 1$
Rotation x-Achse	$k_x = 0.63$
Rotation y-Achse	$k_y = 0.4$
Rotation z-Achse	$k_z = 0.2$

Tabelle 2.8.: Gewichtungsfaktor zur Bewertung kombinierter Schwingungen mehrerer Freiheitsgrade der Sitzoberfläche einer sitzenden Person

Überträgt man die hier beschriebenen Gewichtungsfaktoren der Körperschwingungen auf die Fahrzeugbewegung, so wären die translatorischen Beschleunigungen als besonders wichtig für die Fahrerwahrnehmung einzustufen. Die Wankbewegung wird als die wichtigste rotatorische Beschleunigung für die subjektive Wahrnehmung beschrieben, gefolgt von der Nickbeschleunigung und Gierbeschleunigung.

## 2.6. Zielsetzung

Betrachtet man den hier aufgezeigten Stand der Technik, so wird die Vielzahl der Untersuchungen zum Seitenwindverhalten von Personenkraftwagen zu einzelnen Umfängen der Gesamtwirkkette deutlich. Die dabei beschriebenen neuen Erkenntnisse zu Charakteristika instationärer aerodynamischer Anregungen stellen die klassischen Ansätze zur Auslegung des Seitenwindverhaltens von Personenkraftwagen in Frage. Es zeigt sich, dass die auftretenden Charakteristika instationärer aerodynamischer Anregungen auf Basis stationärer aerodynamischer Kennfelder nicht beschrieben werden können. Durch die Zwangskopplung der einzelnen Anregungsgrößen der Längs-, Seiten- und Vertikalkraft sowie des Wank-, Nick- und Giermoments über die gemessenen stationären Kennfelder kann eine zeitlich variable Zusammensetzung der aerodynamischen Anregung nicht abgebildet werden.

Für die Fahrwerksauslegung der Personenkraftwagen ist somit zu klären, inwiefern instationäre aerodynamische Anregungen das Antwortverhalten von Personenkraftwagen beeinflussen. Daraus ist abzuleiten, ob die Betrachtung dieser Einflüsse bei der Auslegung des Seitenwindverhaltens erforderlich ist. In der frühen Phase der Fahrzeug- und Fahrwerksentwicklung ist das Seitenwindverhalten über Simulationswerkzeuge abzubilden und zu bewerten. Aufgrund der geringen Größenordnung der hauptsächlich auftretenden Seitenwindanregung sollte die simulative Abbildung der Fahrzeugantwort auf vergleichsweise geringe Queranregungen validiert werden. In Anbetracht der instationären aerodynamischen Charakteristika gilt es zudem, den Nutzen des energieaufwändigen Betriebs einer Seitenwindanlage zur Auslegung des Seitenwindverhaltens zu bewerten.

Darüberhinaus sind die relevanten Fahrzeug- und Fahrwerkparameter für die resultierende Fahrzeugantwort zu identifizieren. Im Gegensatz zu den in der Literatur beschriebenen Erkenntnissen zur Einflussgröße ausgewählter Fahrzeug- und Fahrwerksparameter ist hierbei eine gesamthafte Analyse durchzuführen. Dazu sind quantitative und somit vergleichbare Aussagen zur Einflussgröße der Parameter abzuleiten.

Neben der Analyse der Wirkkette einer Störung durch instationäre aerodynamische Anregungen gilt es, die Bewertung der Fahrzeugbewegung durch den Fahrer zu untersuchen. Für die subjektive Wahrnehmung des Fahrers der Fahrzeugreaktion auf instationäre Anregungen sind objektive Kennwerte der kombinierten und stoßartigen Fahrzeugreaktionen auf Seitenwindböen zu ermitteln. Dabei gilt zu beachten, dass hauptsächlich auftretende, reale aerodynamische Anregungen zu geringen Fahrzeugreaktionen im Bereich der Wahrnehmungsschwelle führen.

Aus den gewonnenen Erkenntnissen ist bedarfsgerecht eine Methodik zur Grundausslegung des Fahrzeug und Fahrwerks zum Seitenwindverhalten bezüglich instationärer aerodynamischer Anregungen abzuleiten.



### 3. Definition relevanter aerodynamischer Anregungen

Zur Untersuchung des Einflusses aerodynamischer Störgrößen auf das Fahrverhalten von Personenkraftwagen werden im Folgenden charakteristische Anregungsarten definiert. Dabei stellt sich die Frage, welche Art und Größenordnung der real auftretenden aerodynamischen Anregungen entscheidend für die Bewertung des Seitenwindverhaltens durch den Fahrer sind. Entsprechend des existierenden Standards ist das Seitenwindverhalten von Personenkraftwagen durch eine Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage zu bewerten. Die in der Norm beschriebene Seitenwindgeschwindigkeit beträgt  $v_{Wind} = 20$  m/s [74]. Betrachtet man die in Tabelle 2.2 aufgeführten, gemessenen Windgeschwindigkeiten, so liegt eine derartige Anregung eher im Bereich der Starkwinde zwischen 10 und 30 m/s. Wie in Abschnitt 2.2.2 erläutert, sind die in Zentraleuropa im Mittelwert real auftretenden Peakwerte der Geschwindigkeiten von Seitenwindböen deutlich geringer.

Seitenwindstörungen einer durchschnittlich auftretenden Windstärke führen dabei zu Fahrzeugreaktionen, die eine für den Fahrkomfort relevante Größenordnung aufweisen. Die Fahrzeugreaktion auf Starkwinde kann darüberhinaus in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit eine sicherheitsrelevante Größe darstellen. Jedoch wird bei Starkwinden die Windstärke oftmals durch den Fahrer über visuelle Merkmale wie das Biegen von angrenzenden Bäumen oder Windfahnen an Autobahnbrücken wahrgenommen. Aufgrund der visuellen Wahrnehmung der aerodynamischen Anregungsstärke wird die resultierende Fahrzeugreaktion bei Starkwinden durch den Fahrer seltener als Resultat eines schlechten Seitenwindverhaltens des Personenkraftwagens interpretiert.

Zumeist wird bei Wahrnehmung des Starkwindes auch die Reisegeschwindigkeit durch den Fahrzeuggelenker reduziert, was die Seitenwindanfälligkeit des Personenkraftwagens vermindert [111]. Durch die Verringerung der Fahrzeuggeschwindigkeit wird das Dämpfungsmaß der Fahrzeugbewegung erhöht und die Fahrzeugreaktion vermindert. Der subjektive Eindruck der Spuretreue des Fahrzeugs wird somit verbessert. Nimmt der Fahrer die auftretende Windanregung als Ursache der Fahrzeugreaktion nicht wahr, so kann es sein, dass die Abweichung von der Solltrajektorie als minderwertige Ausprägung des Geradeauslaufs des Personenkraftwagens interpretiert wird. Daraus lässt sich ableiten, dass die Seitenwindanregung mit geringeren Amplituden entscheidend für die komfortrelevante Auslegung des Störungsverhaltens ist.

Da sowohl der sicherheits- und komfortrelevante Aspekt des Seitenwindverhaltens für die kundenwerte Ausprägung der Fahrdynamik eines Personenkraftwagens relevant ist, werden im Folgenden beide Anregungsniveaus in Form einer Seitenwindanlage und einer Seitenwindböe geringerer Anregungsamplitude betrachtet. In [175] wird empfohlen, die Bewertung der Fahrzeugreaktion an einer Seitenwindanlage bei Anregung der fahrzeugspezifischen Maxima der Sei-

### 3. Definition relevanter aerodynamischer Anregungen

tenkraft und des Giermoments durchzuführen. Aufgrund der Standardisierung des Versuchs an einer Seitenwindanlage und den beschriebenen, real auftretenden Starkwinden als repräsentative Anregung wird die Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage mit einer Anströmgeschwindigkeit von  $v_{Wind} = 80 km/h$  quer zur Fahrtrichtung dargestellt.

Um einen systematischen Ansatz zur Untersuchung der Einflussgröße von Anregungseigenschaften zu realisieren, sind die aerodynamischen Anregungen generisch definiert. Zur Definition der generischen aerodynamischen Anregung werden die auftretenden aerodynamischen Kräfte und Momente der sechs Freiheitsgrade des Fahrzeugaufbaus wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben nach Abbildung 3.1 aus aerodynamischen Kennfeldern abgeleitet.

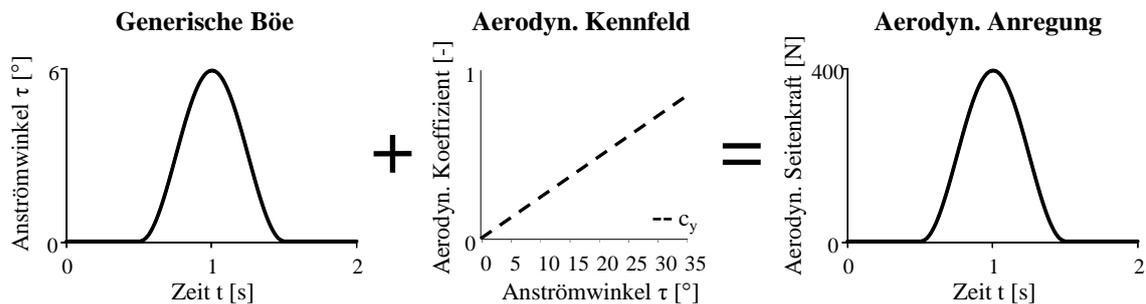


Abbildung 3.1.: Ableitung der aerodynamischen Kräfte einer quasi-stationären Seitenwindböe aus den aerodynamischen Kennfeld des Fahrzeuges

## 3.1. Arten der aerodynamischen Anregung

Die im Rahmen der vorliegenden Arbeit betrachteten aerodynamischen Anregungen unterscheiden sich neben dem Anregungsniveau im qualitativen Verlauf der Seitenwindstörung. Um die Anströmung der Personenkraftwagen durch eine Seitenwindanlage zu analysieren, wurde die Strömungsgeschwindigkeit der Ventilatoren einer Seitenwindanlage mit Pitotsonden vermessen. Abbildung 3.2 zeigt den gemessenen Geschwindigkeitsverlauf von zwei Ventilatoren aus [166].

Es stellt sich die Frage, inwiefern die Anströmungsverhältnisse der Anordnung der zusammengesetzten Ventilatoren eine stationäre bzw. instationäre Anströmung darstellt. Betrachtet man die Geschwindigkeitsverteilung der aerodynamischen Anströmung über die gesamte Fläche der Ventilatoren, so lässt sich diese in Näherung als eher homogen bezeichnen. Die hier gemessene Strömungsgeschwindigkeit der betrachteten, aneinander angrenzenden Ventilatoren variiert maximal um  $\Delta v = 3 km/h$ . Die direkte Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage kann deshalb als eine stationäre Phase der aerodynamischen Anströmung bezeichnet werden.

Betrachtet man jedoch Ein- und Ausfahrt der Seitenwindanlage, so zeigt sich eine plötzliche Änderung der Anströmungsverhältnisse von den natürlichen Windbedingungen zu einer Anströmung durch die Ventilatoren. Infolge von Fahrzeuggeschwindigkeiten  $> 120 km/h$  bei Vorbeifahrt an der Seitenwindanlage resultiert dabei ein abrupter, kurzzeitiger Anstieg sowie Abfall der Anströmgeschwindigkeit. Die Anregung bei Durchfahrt der Seitenwindanlage ist somit als eine Mischform stationärer und instationärer Anströmung zu betrachten. Der qualitative Verlauf

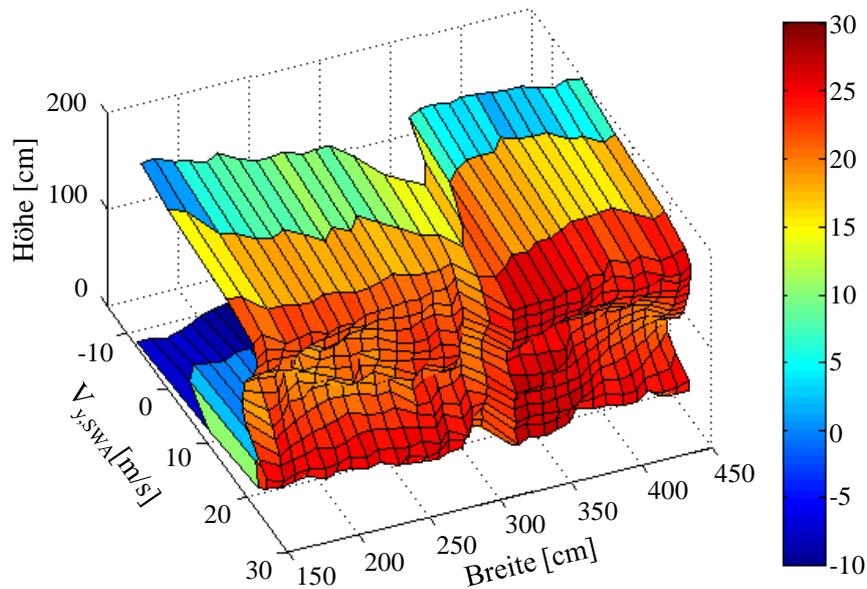


Abbildung 3.2.: Gemessenes Geschwindigkeitsprofil zwei nebeneinanderliegender Ventilatoren der Seitenwindanlage nach [166]

der aerodynamischen Anströmung bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage entspricht einem trapezförmigen Peak analog der Darstellung in Abbildung 2.3 (c) aus Abschnitt 2.2.1.

Zur Beschreibung einer repräsentativen generischen Seitenwindböe wird der zeitliche Verlauf des Anströmwinkels eines einfachen Peaks definiert. Der Anströmwinkelverlauf wird dabei über dem Verlauf einer gaußschen Glockenkurve vergleichbar wie in [33] dargestellt. Die generisch definierte Böenanregung erstreckt sich dabei über eine Gesamtstrecke von zirka 80m, was je nach Fahrzeuggeschwindigkeit in etwa einer Anregungsfrequenz zwischen 0.5 und 1.0 Hz entspricht. Die Böe weist hierbei eine Gesamtamplitude der Windgeschwindigkeit von 4 m/s auf. Dies entspricht einer in Zentraleuropa vorherrschenden, durchschnittlichen Amplitude der Windgeschwindigkeit. Im Gegensatz zur Anregung mittels einer Seitenwindanlage weist der Anströmwinkel der generischen Seitenwindböe kein stationäres Plateau im Zeitverlauf auf.

Wie in Abschnitt 2.2.1 beschrieben, ist der Hauptteil der Seitenwindböen durch einen Vorzeichenwechsel des Anströmwinkels charakterisiert. Nur 28 % der Seitenwindböen resultieren aus einer stationären longitudinalen Anströmung des Fahrzeuges von etwa  $\tau = 0^\circ$ . Die definierte Böe wird entsprechend dieser Erkenntnis mit einer Vorzeichenänderung des Anströmwinkels von  $\tau = 3^\circ$  zu  $\tau = -3^\circ$  und wieder zu  $\tau = 3^\circ$  und zudem als Seitenwindböe ohne einen Vorzeichenwechsel von  $\tau = 0^\circ$  zu  $-6^\circ$  und wieder zu  $0^\circ$  definiert. Die zu Beginn der Böe vorherrschende Anströmung mit einem konstanten Anströmwinkel kann hier als vorherrschende, stationäre Windanströmung verstanden werden. Die hier beschriebenen Verläufe des Anströmwinkels gelten dabei für eine Fahrzeuggeschwindigkeit von  $v_{Fzg} = 140 \text{ km/h}$ .

In folgender Abbildung 3.3 wird der Zeitverlauf des Anströmwinkels der untersuchten generischen aerodynamischen Anregungen aufgezeigt. Hierbei wird (a) die Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage, (b) die Anregung durch eine generische, transiente Seitenwindböe QSG oh-

ne Vorzeichenwechsel im Anströmwinkel und (c) die Anregung durch eine generische, transiente Seitenwindböe QSG mit Vorzeichenwechsel im Anströmwinkel unterschieden.

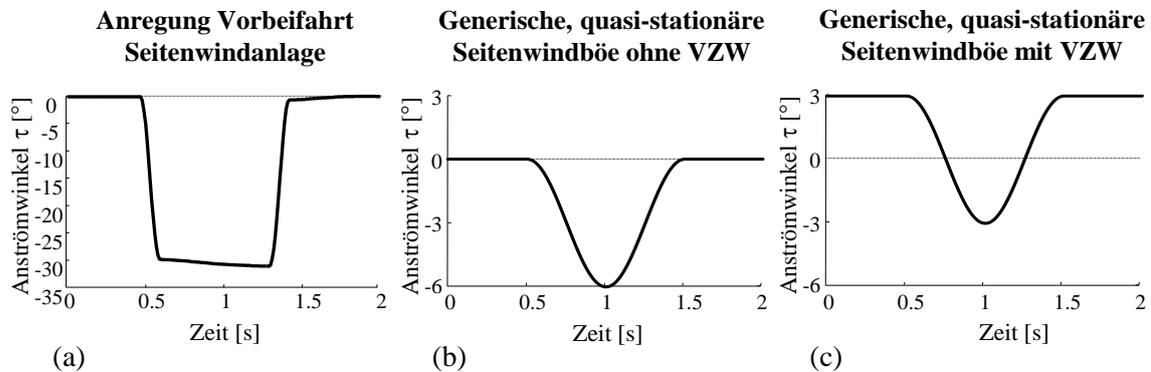


Abbildung 3.3.: Anströmwinkelverlauf der generischen Anregung durch eine Seitenwindanlage (a), eine generischen Böe ohne (b) und mit (c) Vorzeichenwechsel

Die dargestellten Graphen zeigen den Zeitverlauf des Anströmwinkels bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von  $v_{Fzg} = 140 km/h$ . Betrachtet man die dargestellten Anregungen, so zeigt sich der niederfrequente Verlauf der generischen Anregungen. Höherfrequente Anteile natürlich auftretender Seitenwindanregung  $> 3 Hz$  werden aufgrund der identifizierten geringen Amplituden und des somit für die Fahrzeugreaktion irrelevanten Einflusses nicht betrachtet.

## 3.2. Variation der aerodynamischen Anregung

Die beschriebenen, qualitativen Verläufe der aerodynamischen Anregungen können dabei quantitativ hinsichtlich der Anregungsamplituden sowie bezüglich des zeitlichen Aufbaus variiert werden. Dadurch lässt sich eine generische Seitenwindböe bezüglich ihrer Amplituden und zeitlichen Zusammensetzung der aerodynamischen Kräfte und Momente derart anpassen, so dass diese der Beschreibung einer instationären aerodynamischen Seitenwindböe USG entspricht. Zur Definition einer generischen instationären, aerodynamischen Anregung wird somit die transiente generische Seitenwindböe QSG nach Charakteristika instationärer aerodynamischer Anregungen modifiziert.

Wie in [160] beschrieben, können durch simulative Ansätze der Aerodynamik charakteristische Werte von Verstärkungsfaktoren und Zeitverzügen instationärer Seitenwindböen ermittelt werden. Dies ist über den Vergleich der Ergebnisse einer durch CFD-Berechnung simulierten Böe mit den Kräften und Momenten einer generischen quasi-stationären Böe vergleichbaren Anströmwinkelverlaufs realisierbar. Die Zeitverläufe der aerodynamischen Seitenkraft, des Gier- und des Wankmoments zeigen in der referenzierten Literatur deutliche Unterschiede hinsichtlich der Amplituden der Peakwerte sowie im zeitlichen Auftreten der Peakwerte auf. Die hierbei ermittelten Kenngrößen können genutzt werden, um nach Gleichung (3.1) die Amplitude einer transienten Böe entsprechend einer instationären Seitenwindböe anzupassen.

$$\max(F_{y,USG}) = \lambda_{y,USG} \max(F_{y,QSG}) \quad (3.1)$$

Da der Zeitverlauf der einzelnen aerodynamischen Kräfte und Momente wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben bei Ableitung aus einem aerodynamischen Kennfeld korreliert, gilt es die transiente Seitenwindböe entsprechend den zeitlichen Charakteristika instationärer Anregungen zu modifizieren. Nach Gleichung (3.2) wird dazu eine generische transiente Böe entsprechend der Zeitverzüge der instationären Seitenwindböe angepasst.

$$t(\max(F_{y,USG})) = t(\max(F_{y,QSG})) + \Delta t_{y,USG} \quad (3.2)$$

Der Wert der Zeitverzüge der einzelnen Anregungsgrößen einer aerodynamischen Störgröße hängt nach [160] von folgenden Faktoren ab. Die definierten Zeitverzüge sind zum Einen von der Fahrzeuglänge und Fahrzeuggeschwindigkeit sowie den zeitlichen Kenngrößen der der Seitenwindböe abhängig. Zum Anderen ist die Fahrzeugform, insbesondere die Form des Fahrzeughecks entscheidend. Um die Auswirkungen instationärer Charakteristika auf die Fahrdynamik gesamthaft zu analysieren, wird der Einfluss der auftretenden Änderungen der Amplituden und Zeitverzüge einzelner aerodynamischer Kraft- und Momentenverläufe im Einzelnen und darüberhinaus in Kombination untersucht. Abbildung 3.4 zeigt die hierbei resultierenden Variationen der generischen aerodynamischen Seitenwindböe.

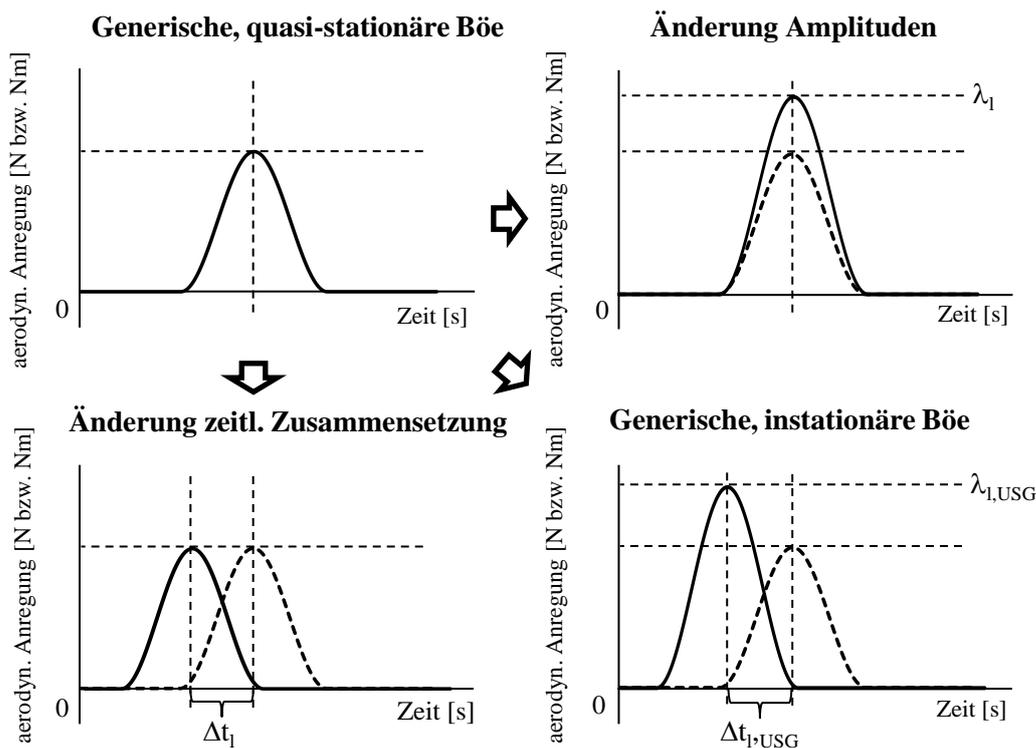


Abbildung 3.4.: Variation Anregungsverläufe zur Definition einer generischen Seitenwindböe

Nach der Definition der zu untersuchenden aerodynamischen Anregungen gilt es, die Auswirkungen aerodynamischer Störgrößen auf die Fahrzeugbewegung zu bestimmen. Im Folgenden wird die dazu genutzte Modellierung der Fahrzeugbewegung beschrieben.



## 4. Simulation der Fahrzeugantwort

Zur Untersuchung des Störungsverhaltens von Personenkraftwagen unter aerodynamischen Einflüssen wird die Fahrzeugreaktion im Rahmen der folgenden Untersuchungen simulativ ermittelt. Zur simulativen Analyse des Einflusses instationärer, aerodynamischer Anregungen werden unterschiedliche Fahrzeug- und Fahrwerksarchitekturen abgebildet. Dabei gilt es, eine simulative Abbildung der Fahrzeugreaktion unter aerodynamischen Einflüssen darzustellen, die einer geforderten Berechnungsgenauigkeit entspricht. Die Simulationen werden dazu je nach Zielsetzung der Berechnung durch ein Zweispur- oder auch durch ein Mehrkörpersimulationsmodell der jeweiligen Personenkraftwagen realisiert.

Im Folgenden wird auf die simulative Abbildung der Fahrdynamik der Fahrzeugmodelle eingegangen. Zur Überprüfung der Aussagefähigkeit der Simulationsergebnisse wird eine Validierung der Simulationswerkzeuge hinsichtlich der Abbildung des Störungsverhaltens von Personenkraftwagen unter Seitenwindeinfluss dargestellt. Dabei werden zwei verschiedene Anregungsarten unterschieden. Zum einen wird die Fahrzeugreaktion bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage genauer betrachtet. Da die in Kapitel 3 beschriebenen generischen Seitenwindböen im Vergleich zu klassischen fahrdynamischen Untersuchungen der Querdynamik kleine Querkräfte aufweisen, wird die Abbildung der Fahrzeugreaktion auf kleine, instationäre Seitenkräfte genauer betrachtet.

Zur Quantifizierung der Unterschiede in der Fahrzeugreaktion bei Parametervariationen der aerodynamischen Anregung, des Fahrwerkes oder des Gesamtfahrzeuges wird auf die Auswertemethodik der Simulationsergebnisse eingegangen. Hierbei werden die zu betrachteten Kenngrößen der Fahrzeugbewegung beschrieben.

### 4.1. Untersuchte Fahrzeug- und Fahrwerkstypen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine Auswahl unterschiedlicher Fahrzeugtypen untersucht. Dabei werden Fahrzeuge aus verschiedenen Fahrzeugklassen von der Oberklasse bis zum Kleinwagen betrachtet. Darüberhinaus werden auch Fahrzeuge der selben Fahrzeugklasse mit variierenden Fahrwerksarchitekturen an Vorder- und Hinterachse untersucht. Durch die Auswahl der unterschiedlichen Fahrzeugtypen und Achsarchitekturen ist es nicht das Ziel, den Einfluss einzelner Fahrwerksparameter abzuleiten. Vielmehr soll hierbei die Varianz der Fahrzeugreaktion auf eine aerodynamische Störgröße aufgezeigt werden. Die folgende Tabelle 4.1 zeigt eine Übersicht der betrachteten Fahrzeugklassen, Karosseriebauformen und Fahrwerksarchitekturen. Zudem ist in Abbildung 4.1 eine Übersicht ausgewählter Fahrzeugparameter der betrachteten Fahrzeuge dargestellt. Hierbei sind Fahrzeugparameter wie beispielsweise Fahrzeugmasse  $m_{Fzg}$ , Spurweite  $l_s$  oder Achslastverteilung  $m_{h/v}$  bezogen auf die Parameter des Fahrzeugs V1 aufgetragen, die in der Literatur als relevant für das Seitenwindverhalten beschrieben werden.

#### 4. Simulation der Fahrzeugantwort

Nr.	Fahrzeug- klasse	Karosserie- bauform	Variante Vorderachse	Variante Hinterachse
V1	Oberklasse	Stufenheck, 4-türig	Doppelquerlenker- Vorderachse	Vier-Punkt Integral-Hinterachse
V2	Oberklasse	Stufenheck, 4-türig	Doppelgelenk- Zugstrebenachse	Vier-Punkt Integral-Hinterachse
V3	Obere Mittelklasse	Stufenheck, 4-türig	Doppelgelenk- Zugstrebenachse	Vier-Punkt Integral-Hinterachse
V4	Obere Mittelklasse	Stufenheck, 4-türig	Doppelgelenk- Federbeinachse	Mehrlenkerachse
V5	Obere Mittelklasse	Kombi, 4-türig	Doppelquerlenker- Vorderachse	Vier-Punkt Integral-Hinterachse
V6	Mittelklasse Fahrzeug	Stufenheck, 4-türig	Doppelgelenk- Zugstrebenachse	Fünflenkerhinterachse
V7	Geländewagen (SUV)	Steilheck, 4-türig	Doppelquerlenker- Vorderachse	Vier-Punkt Integral-Hinterachse
V8	Kleinwagen	Steilheck, 2-türig	Eingelenk- Federbeinachse	Zentrallenkerachse

Tabelle 4.1.: Untersuchte Fahrzeugklassen, Karosseriebauformen und Achsarchitekturen

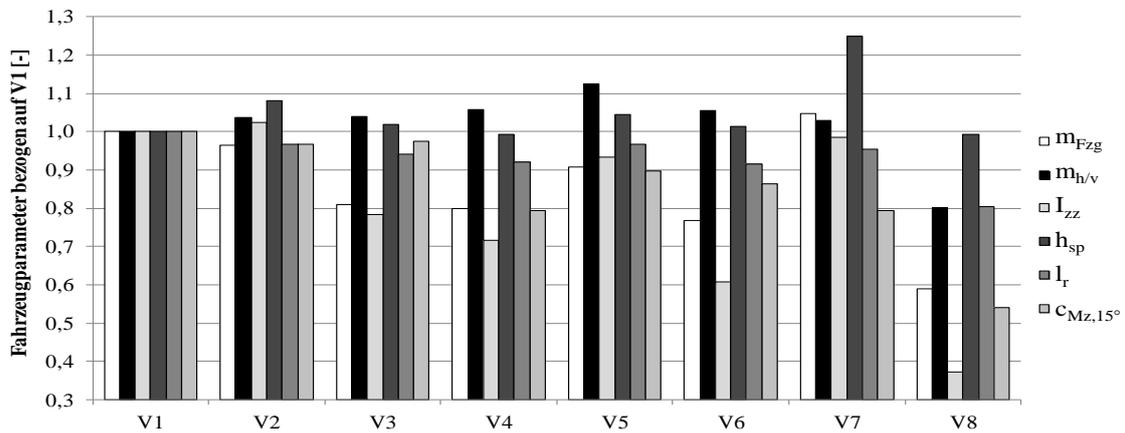


Abbildung 4.1.: Gegenüberstellung einer Auswahl der Fahrzeugparameter bezogen auf V1

Vergleicht man die aufgetragenen Parameter von Fahrzeug V1 und V2 sowie Fahrzeug V3 und V4, so wird die Ähnlichkeit der Fahrzeuge deutlich. Die Fahrzeuge wurden ausgewählt, um die Auswirkungen kleiner Unterschiede der Fahrzeugparameter auf das Seitenwindverhalten aufzeigen zu können.

## 4.2. Zweispurmodellierung in ISAR

Zur Simulation der Fahrzeugantwort bei aerodynamischer Anregung wurde zum einen die Abbildung der Fahrdynamik mittels eines wie in Abschnitt 2.3.1 beschriebenen mathematischen Fahrzeugmodells, eines Zweispurmodells genutzt. Als Simulationswerkzeug zur Zweispurmodellierung wurde hierbei das Berechnungsprogramm ISAR der BMW AG angewendet [9, 94]. Über das hier verwendete Zweispurmodell wird eine Simulation der Fahrdynamik eines Personenkraftwagens mit 16 DOF dargestellt.

Zur Abbildung der betrachteten Fahrzeug- und Fahrwerksarchitekturen werden die Bewegungsgleichungen des Zweispurmodells mit den relevanten Fahrzeug- und Fahrwerkskenngrößen parametrisiert. Dabei wird die Elasto-Kinematik des Fahrwerks an Vorder- und Hinterachse über ermittelte Kennlinien der Vorspur-/Sturzkurven in Abhängigkeit des Radhubes und der Querkraft abgebildet. Diese Kennlinien können dabei aus Messungen an einem K&C-Prüfstand ermittelt beziehungsweise über Abbildungen der Elasto-kinematik einem Mehrkörpersimulationsmodell berechnet werden. Die Modellierung der Reifen erfolgt über die Abbildung des Reifenmodells MF-Tyre Version 5.2. Die Parametrierung des Reifenmodells erfolgt aus Prüfstandmessungen des betrachteten Reifentyps. Über eine Berechnung in Matlab/Simulink<sup>®</sup> werden die Bewegungsgrößen des Zweispurmodells ermittelt. Die Gleichungssysteme der Ordinary-Differential-Equations werden dabei mittels des integrierten Solvers ODE1 der Partial Differential Equation Toolbox (Eulerverfahren) gelöst. In der vorliegenden Arbeit wird die Zweispurmodellierung zur Sensitivitätsanalyse der Fahrzeugreaktion unter Seitenwind auf Parameteränderungen des Fahrwerks, der Fahrzeugene sowie der aerodynamischen Anregung genutzt.

## 4.3. Mehrkörpersimulation in ADAMS

Zur Simulation der Fahrzeugreaktion bei einer aerodynamischen Anregung wurden zudem MKS-Modelle in ADAMS/CAR<sup>®</sup> [115] angewendet. Das hier genutzte Simulationsprogramm ist ein kommerzielles verfügbares Werkzeug zur Berechnung der Mehrkörperdynamik von Kraftfahrzeugen. Das Programm verfügt über einen auf Fortran/C++ basierenden Solver zur Lösung der partiellen DAE-Systeme zur Beschreibung der Fahrzeugbewegung [3, 100, 118].

Die Parametrierung des Mehrkörpermodells erfolgt hierbei über die Vermessung einzelner Fahrwerksbauteile an Messprüfständen beispielsweise zur Ermittlung der Federsteifigkeit des Federungssystems oder zur Bestimmung der Gummilagerkennlinien. Die Modellierung der Reifen wird auch hierbei über die Abbildung eines aus Prüfstandmessungen parametrisierten Reifenmodells des MF-Tyre Version 5.2 realisiert. Das genutzte MKS-Modell kann vor allem zur Einflussanalyse von Kenngrößen einzelner Fahrzeugbauteile wie z.B. Kennlinien der Gummilager genutzt werden. Nachteil der Mehrkörpersimulation ist der im Vergleich zur Simulation mittels eines Zweispurmodells deutlich höhere Aufwand für Modellaufbau und Parametrierung. Zudem weist die Mehrkörpersimulation eine vergleichsweise längere Berechnungsdauer für einzelne Manöver auf. Dies wird jedoch erst bei größeren Simulationsreihen wie zum Beispiel Parametervariationen relevant. Die Simulationsergebnisse der Zweispurmodellierung und des MKS-Modells sind untereinander validiert, so dass ein Vergleich von Relativaussagen zur Fahrdynamik identischer Fahrzeugmodelle über die Modellierungsansätze hinweg möglich ist.

## 4.4. Validierung der Fahrdynamiksimulation

Um die Anwendbarkeit der hier beschriebenen Simulationswerkzeuge auf Fragestellungen der vorliegenden Untersuchung zu überprüfen, wurden die Berechnungsergebnisse der Fahrdynamiksimulation validiert. Generell sind die Ergebnisse der Fahrdynamiksimulationsmodelle für die klassischen Fahrmanöver wie z. B. stationäre Kreisfahrt oder Sinuslenken mit Messungen aus dem Fahrversuch abgeglichen. Für die Validierung der Abbildung der Fahrzeugreaktion bei aerodynamischen Anregungen werden im Folgenden Simulationsergebnisse des Fahrzeugs V3 mit Messungen aus dem Fahrversuch verglichen.

Zum Abgleich der Simulation mit den Ergebnissen des Fahrversuchs wurde das betrachtete Versuchsfahrzeug vermessen und die Simulationsmodelle entsprechend parametrisiert. Dazu wurden die Verläufe der Vorspur-/Sturzkurven der Vorder- und Hinterachse des Versuchsfahrzeugs an einem K&C-Prüfstand für das Zweispurmodell ermittelt bzw. für das MKS-Modell plausibilisiert [145]. Die Parametrierung der Modelle erfolgt dabei über ein zentrales PDM/CAE-Datenbanksystem. Das Gewicht und die Gewichtsverteilung der Radlasten des Versuchsfahrzeugs inklusive Messtechnik und Versuchsfahrer wurde über eine Fahrzeugwaage vermessen. Mittels eines Pendelprüfstands wurden die Massenträgheitsmomente des Fahrzeuges  $I_{xx}$ ,  $I_{yy}$  und  $I_{zz}$  bestimmt. Über Messungen im Windkanal wurde das stationäre, aerodynamische Kennfeld in Abhängigkeit des Anströmwinkels  $\tau$  um die Hochachse des Fahrzeuges vermessen und als Grundlage für die Vorgabe der aerodynamischen Anregung genutzt. Die Abhängigkeit der aerodynamischen Anregung vom Anströmwinkel um die Längsachse und Querachse des Fahrzeuges wird im Folgenden vernachlässigt. Die Parametrierung des Reifenmodells erfolgt mittels Parameteridentifikation durch eine Vermessung des Reifentyps am Reifenprüfstand.

Über ein im Fahrzeug verbauten Kreiselssystem können die charakteristischen Größen der Fahrzeugbewegung gemessen werden. Durch die Kopplung dieses inertialen, referenzlosen Navigationssystems mit einem GPS-System ist es möglich, die absoluten Positionsdaten des Fahrzeuges während der Messung zu ermitteln. Über Seilzugwegaufnehmer wird zudem der Radhub an Vorder- und Hinterachse gemessen.

### 4.4.1. Fahrzeugantwort bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage

Zunächst wird die simulative Abbildung der Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage betrachtet. Hierbei wurde die Fahrzeugreaktion des Fahrzeuges V3 bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage in einem Open-Loop-Manöver vermessen. Die dazu genutzte Seitenwindanlage weist dabei eine Länge von 32m auf. Zur genauen Ermittlung der Anregungsgröße der Seitenwindanlage wurden die Strömungsgeschwindigkeit der Ventilatoren vermessen [166]. Durch Mittelung der gemessenen Geschwindigkeiten lässt sich bei den vorgegebenen Einstellungen der Seitenwindanlage eine mittlere Strömungsgeschwindigkeit von  $\bar{v}_{SWA} = 78$  km/h ermitteln. In Abbildung 4.2 ist die Modellierung des Geschwindigkeitsverlaufs der Seitenwindanströmung in der Simulation sowie exemplarisch die Bahnkurve des Fahrzeuges abweichend von der Geradeausfahrt ohne Störung dargestellt.

Als Vorgabe der aerodynamischen Anregung wird die Anströmung bei Vorbeifahrt an der Seitenwindanlage durch eine Rampenfunktion nach Abbildung 4.2 definiert. Die aerodynamischen Kräfte und Momente am Versuchsfahrzeug werden dabei vereinfacht als quasi-stationäre

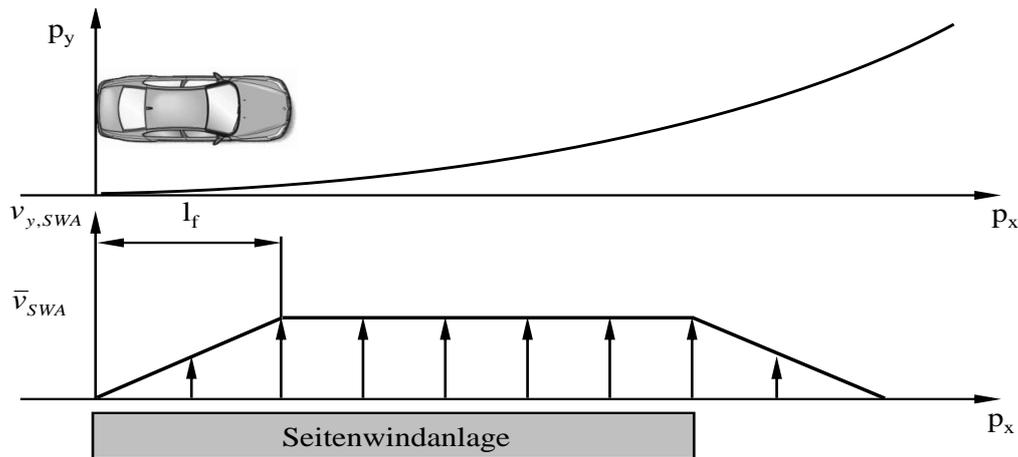


Abbildung 4.2.: Verlauf der Querabweichung und Abbildung der Seitenwindgeschwindigkeit in der Simulation

Anregung aus den stationären Kennfeldern nach Abschnitt 2.2.2 bestimmt. Für die Berechnung der aerodynamischen Anregungsgrößen wurden die Werte der während des Versuchs vorherrschenden Luftdichte  $\rho$  entsprechend der Lufttemperatur  $T_L$  und des -drucks  $p_L$  ermittelt. Dabei gilt es die Einflüsse natürlicher Seitenwindböen auf die Messergebnisse des Realversuches zu minimieren. Dazu wurden die Fahrversuche nur bei mittleren Böengeschwindigkeiten des natürlichen Winds kleiner 5 km/h durchgeführt. Zur Auswertung der Simulations- und Messergebnisse werden die CVs der Fahrzeugbewegung berechnet. Um den Einfluss von Störgrößen auf das Versuchsergebnis zu minimieren, wurden die Messungen im Realversuch jeweils fünffach wiederholt und Messergebnisse gemittelt.

In Abbildung 4.3 sind die CVs der maximalen Querbeschleunigung bei einer konstanten Fahrzeuggeschwindigkeit von 80 km/h bis 160 km/h aus Simulation und Realversuch dargestellt. Es werden Simulationsergebnisse des Zweispurmodells in ISAR, die Simulationsergebnisse in ADAMS/CAR<sup>®</sup> und die Messergebnisse des Realversuchs aufgezeigt.

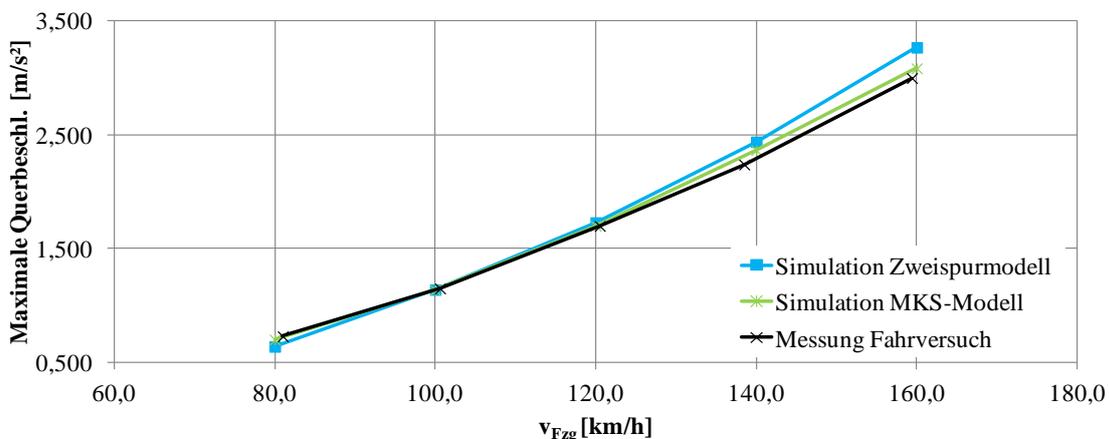


Abbildung 4.3.: Maximale Querbeschleunigung bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage für den Geschwindigkeitsbereich  $v_{Fzg} = 80 \text{ km/h} - 160 \text{ km/h}$

#### 4. Simulation der Fahrzeugantwort

Die Fahrzeuggeschwindigkeit wurde in Schritten um 20 km/h variiert. Um die Unterschiede zwischen den Messungen im Realversuch und den Simulationen im Zweispurmodell sowie im MKS-Modell besser bewerten zu können, sind in Abbildung 4.4 die prozentualen Abweichungen zwischen Versuch und Messung dargestellt.

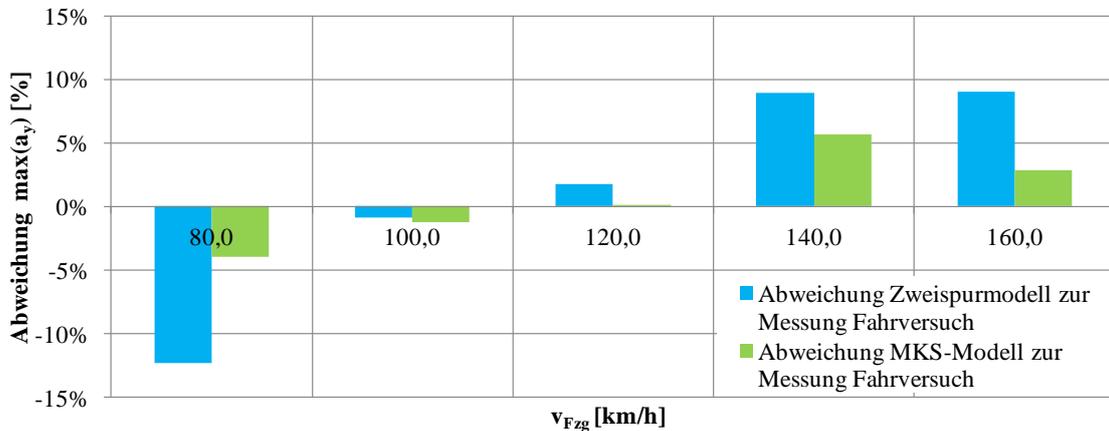


Abbildung 4.4.: Vergleich der maximalen Querbeschleunigung bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage zwischen Simulation und Messung im Realversuch

Betrachtet man den Vergleich zwischen Messung und Simulation, so zeigen sich Abweichungen des Zweispurmodells kleiner 13 % bei einer niedrigen Fahrzeuggeschwindigkeit von 80 km/h und Abweichungen kleiner 9 % im Geschwindigkeitsbereich 100 - 160 km/h. Die Modellierung im MKS-Programm weist Abweichungen kleiner 6 % auf. Ergänzend dazu, sind in Abbildung 4.5 die Simulations- und Messergebnisse der maximalen Giergeschwindigkeit bei Vorbeifahrt an der Seitenwindanlage dargestellt.

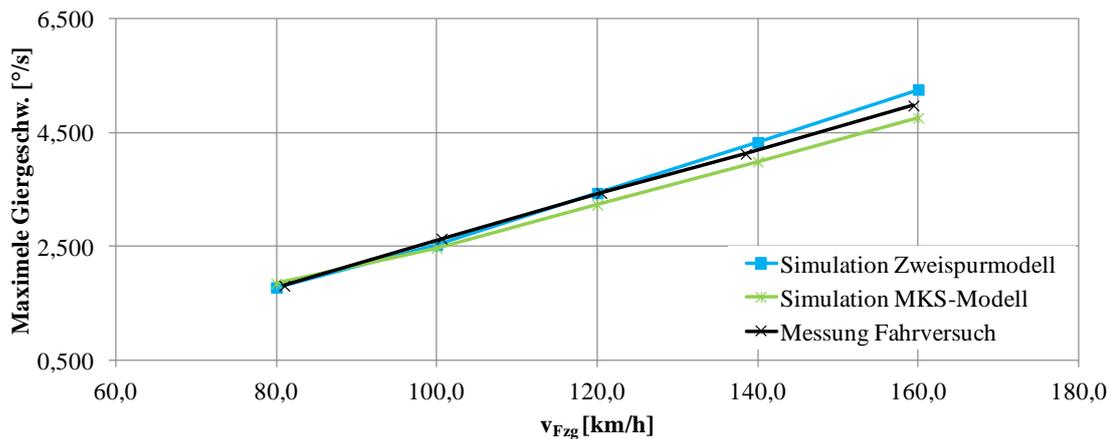


Abbildung 4.5.: Maximale Giergeschwindigkeit bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage für den Geschwindigkeitsbereich  $v_{Fzg} = 80$  km/h - 160 km/h

Zur besseren Vergleichbarkeit sind auch hier die prozentualen Unterschiede zwischen Simulation und Messung in Abbildung 4.6 dargestellt.

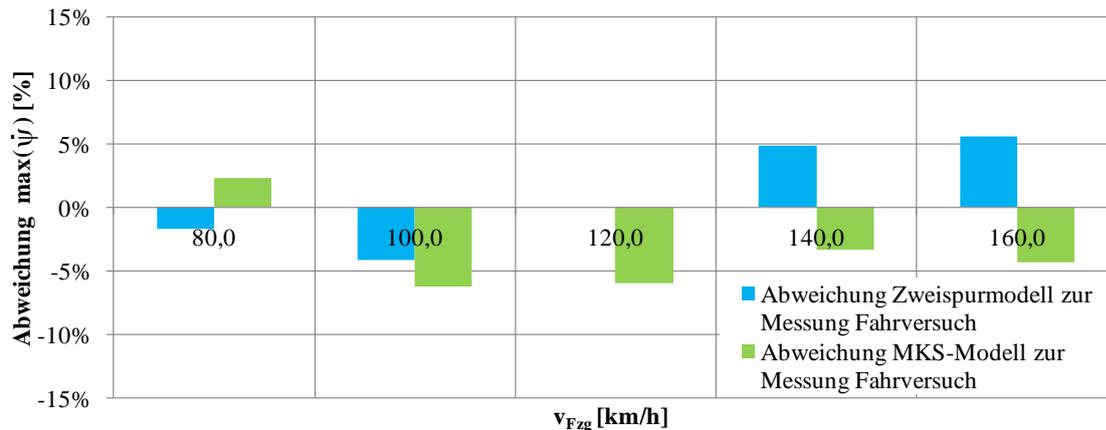


Abbildung 4.6.: Vergleich der maximalen Giergeschwindigkeit bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage zwischen Simulation und Messung im Realversuch

Der Vergleich der Mess- und Simulationsergebnisse für die maximale Giergeschwindigkeit zeigt Abweichungen zwischen ISAR und dem Realversuch kleiner 6 % und zwischen dem MKS-Programm und dem Realversuch kleiner 7 %.

Die identifizierten Abweichungen, die mit der Fahrzeuggeschwindigkeit zunehmen, lassen sich auf die in der Fahrdynamiksimulation vereinfachte Abbildung der aerodynamischen Anregung bei Ein- und Ausfahrt in die Seitenwindanlage zurückführen. Die resultierenden Kräfte und Momente der aerodynamischen Anregung werden im Rahmen der vorliegenden Modellierung, wie in Abbildung 3.3 dargestellt, durch eine Rampe des Anströmwinkels aus dem stationären, aerodynamischen Kennfeld bestimmt. Betrachtet man die Ein- und Austrittsphase des Fahrzeuges genauer, so ergibt sich aufgrund des sequentiellen Eintauchens der Fahrzeugquerfläche in die Anströmung eine Abweichung des Giermomentenverlaufs vom angenommenen, trapezförmigen Verlauf des Anströmwinkels. In [114] werden die Verläufe der aerodynamischen Anregungsgrößen bei Vorbeifahrt an einer konstanten Queranströmung durch Versuche im Modellwindkanal ermittelt. Dabei wird bei Einfahrt in die konstante Anströmung eine Überhöhung des Giermoments sowie bei Ausfahrt ein negatives Giermoment festgestellt. Auch in [57] ist eine Abbildung des Giermomentenverlaufs in Abhängigkeit der von der Seitenwindanlage angeströmten Fläche des Fahrzeuges dargestellt. Bei höheren Geschwindigkeiten des vorbeifahrenden Fahrzeuges wird jedoch der beschriebene Einfluss der Ein- und Austrittsphase auf den Verlauf des Giermoments geringer [158]. Da die Zeitdauer der Ein- und Ausfahrt der Anströmung durch die Seitenwindanlage im Vergleich zur Durchfahrt bei den durchgeführten Versuchen vergleichsweise kurz ist und die stationäre Phase der aerodynamischen Anströmung bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage maßgeblich die Peakwerte der Fahrzeugantwort beeinflusst, sind die Auswirkungen einer Anpassung des Giermomentenverlaufs auf die Fahrzeugreaktion gering. Im Rahmen der erforderlichen Genauigkeit der Untersuchungen werden die identifizierten Abweichungen des realisierten Modellierungsansatzes durch den trapezförmigen Verlauf des Anströmwinkels akzeptiert.

#### 4.4.2. Fahrzeugantwort bei Anregung mit kleinen Querkräften

Klassische Manöver zur Bewertung der Fahrdynamikeigenschaften von Personenkraftwagen, wie eine stationäre Kreisfahrt, werden bei höheren Querbeschleunigungen des Fahrzeugaufbaus durchgeführt. Die Abbildung des Fahrzeugverhaltens über einen linearen Modellierungsansatz ist dabei bis zu einer Größenordnung von etwa  $4m/s^2$  möglich. Jedoch ist unklar, inwiefern nicht-lineare Effekte beim realen Antwortverhalten von Personenkraftwagen bei vergleichsweise geringen Querkräften auftreten. Um die simulative Abbildung der Fahrzeugreaktion bei aerodynamischen Anregungen geringerer Größenordnung realisieren zu können, gilt es eine Validierung des Modells bezüglich des Übertragungsverhaltens von kleinen Querkräften zu realisieren. Dazu wurde, nach einer Idee von Herrn Dipl.-Ing. Thomas Stickel, ein im Fahrzeug fest verbautes Massenpendel nach Abbildung 4.7 genutzt.

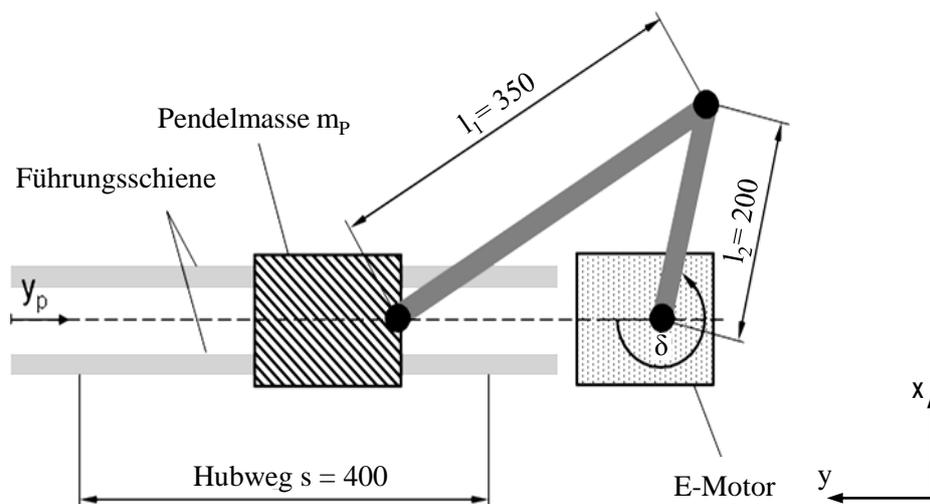


Abbildung 4.7.: Massenpendel zur Validierung der Fahrzeugreaktion auf kleine Querkräfte

Der Versuchsaufbau des Massependels ist in einer Rahmenkonstruktion verbaut. Die Rahmenkonstruktion sowie die Apparatur des Massependels haben ohne die Masse des Pendels ein Gesamtgewicht von 19.0 kg. Zur Realisierung einer möglichst unmittelbaren Anregungsübertragung wird die Rahmenkonstruktion des Massependels über vier Anbindungspunkte mit der Karosserie des Versuchsfahrzeuges verschraubt. Um aerodynamische Einflüsse durch den Versuchsaufbau während der Messung zu vermeiden, wird das Massependel im Inneren des Fahrzeuges verbaut. Bei den im Folgenden aufgezeigten Ergebnissen ist das Massependel im Kofferraum des Fahrzeuges quer zur Fahrzeuglängsrichtung verbaut. Abbildung 4.8 zeigt den Verbau des Massependels im Versuchsfahrzeug.

Zum Abgleich der Messwerte des Fahrversuches mit der simulativen Abbildung wird die Drehzahl des Massependels  $f_p$  zwischen 0.5 und 1.5 U/s variiert. Die Pendelmasse  $m_p$  des Versuchsaufbaus kann dabei über austauschbare Gewichte zwischen 7.0 kg, 8.8 kg und 11.9 kg variiert werden. Die dabei gemessenen Amplituden der durch das Massependel realisierten Seitenkraft variieren in etwa zwischen 30 bis 160 N. Durch die Beschleunigung der Pendelmasse in Fahrzeugquerrichtung wird die Anregung des Fahrzeuges mit einer transienten, reproduzierbaren Seitenkraft realisiert.



Abbildung 4.8.: Verbaue des Massenpendels im Kofferraum des Versuchsfahrzeugs

Im Rahmen von Fahrversuchen wurde das Anregungsniveau des Seitenkraftpendels bewertet. Die Amplituden der Fahrzeugreaktion zeigen, dass die Größenordnung der resultierenden Fahrzeugreaktion einer Fahrzeugreaktion bei natürlichem Seitenwind mittlerer Windstärke entspricht. Führt man sich die Größenordnung der hierbei untersuchten Anregung vor Augen, so ist das Anregungsniveau in etwa mit dem Stoß eines quer rutschenden Getränkekastens bei einer Kurvenfahrt höherer Querschleunigung vergleichbar. Die durch die Pendelanregung realisierte Seitenkraft am Fahrzeug  $F_{y,P}$  entspricht folgendem Zeitverlauf in Gleichung (4.1) bei vorgegebener Rotationsgeschwindigkeit  $\omega$  des zum Antrieb genutzten Elektromotors.

$$F_{y,P} = m_P \omega^2 \frac{l_1^2 \cos 2\delta}{\sqrt{l_2^2 - l_1^2 \sin^2 \delta}} + \frac{l_1^4 \sin^2 \delta \cos^2 \delta}{\sqrt[3]{l_2^2 - l_1^2 \sin^2 \delta}} \quad (4.1)$$

Abbildung 4.9 zeigt den berechneten und gemessenen Kraftverlauf des Massependels bei einer Rotationsgeschwindigkeit des Pendelantriebs von 1.0 U/s und einer Pendelmass von 7.0 kg.

Durch die Konstruktion des Massependels als Kurbeltrieb wird keine reine Sinusschwingung realisiert. Durch die unterschiedlichen Schenkellängen  $l_1$  und  $l_2$  des Kurbeltriebs ergibt sich eine überlagerte Schwingung der Seitenkraft in y-Richtung mit der doppelten Frequenz der Rotation des Antriebes des Massependels. Das überlagerte Seitenkraftsignal weist dabei eine geringere Amplitude als das eigentliche Signal mit der Frequenz des Pendelantriebs auf. Durch minimales Spiel sowie Reibung am Versuchsaufbau des Massependels treten zusätzliche Störgrößen auf, so dass der berechnete Verlauf des Kurbeltriebs im Messaufbau nicht exakt realisiert werden kann. Mit dem beschriebenen Versuchsaufbau lässt sich somit für die Seitenkraftanregung ein Frequenzspektrum mit einem deutlichem Peak bei der Frequenz des Pendelantriebs realisieren.

Da das Anregungssignal nur schwer von anderen Störgrößen gleicher Größenordnung zu trennen ist, werden die Messungen nicht mit einer Anregung in Form eines Frequenzsweeps durchgeführt. Durch die Vorgabe einer konstanten Anregungsschwingung über einen längeren Zeit-

#### 4. Simulation der Fahrzeugantwort

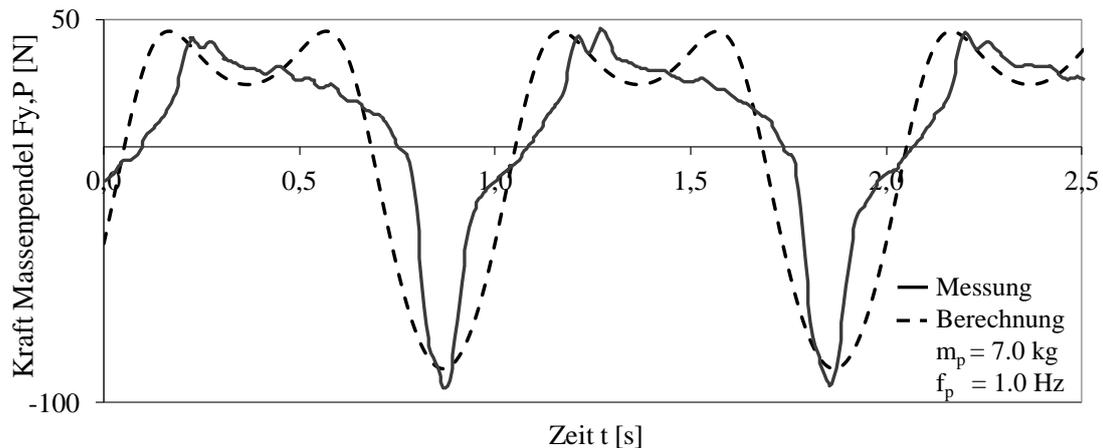


Abbildung 4.9.: Pendelkraftverlauf  $F_{y,P}(t)$  mit einer Frequenz des Pendelantriebs  $f_P = 1.0$  U/s und der Pendelmasse  $m_P = 7.0$  kg

raum ist es besser möglich, die gemessene Fahrzeugreaktion auf die Fahrzeuganregung durch das Massenpendel zurückzuführen.

Die Fahrversuche zur Messung der Fahrzeugreaktion bei Anregung durch das Massependels werden in Form eines Open-Loop Manövers einer Geradeausfahrt mit fixed-control durchgeführt. Dabei wird durch ein Kreiselsystem die Fahrzeugantwort in den sechs DOF des Fahrzeugaufbaus gemessen. Die Versuche wurden dabei bei einer konstanten Fahrzeuggeschwindigkeit durchgeführt. Auch bei diesen Messungen wird durch die Kopplung des inertialen, referenzlosen Navigationssystems mit einem GPS-System die absoluten Positionsdaten des Fahrzeuges während der Messung ermittelt. Über Seilzugwegaufnehmer wird der Radhub an Vorder- und Hinterachse gemessen. Im Versuchsaufbau wird die Beschleunigung des Massenpendels mittels eines Beschleunigungsaufnehmers gemessen. Daraus kann die im Fahrversuch durch Pendelanregung realisierte Seitenkraft am Fahrzeug  $F_{y,P}$  bestimmt werden.

Als Versuchsstrecke wurde eine 2.8 km lange Gerade mit einer Fahrbahnoberfläche aus Betonplatten, auf einem nicht-öffentlichen Versuchsgelände, genutzt. Aufgrund der zu realisierenden Geradeausfahrt bei einer konstanten Fahrzeuggeschwindigkeit sowie einem möglichst stationären Verhalten des Fahrzeugaufbaus über die Zufahrt der Geraden, sowie einer notwendigen Verzögerung bei Abfahrt, kann eine Wegstrecke von 2.0 km zur Messung der Fahrzeugreaktion zielführend genutzt werden. Die Querneigung der Versuchsstrecke beträgt in etwa 0.5 %.

Aufgrund des geringen Anregungsniveaus des Massependels wurde versucht, im Rahmen der Versuchsdurchführung, den Einfluss auftretender Störgrößen möglichst zu minimieren. Trotz Befahren ebener Betonplatten wird das Fahrzeug durch Fahrbahnunebenheiten angeregt. Durch den Vergleich der Amplitudenwerte einer Fast-Fourier-Transformation (FFT) der Vertikalbeschleunigung des Fahrzeugaufbaus in Abbildung 4.10 von zwanzig aufeinanderfolgenden Fahrten auf der Versuchsstrecke wird die Störgröße der Fahrbahnanregung deutlich.

Darüberhinaus ist die Fahrbahn im Abstand von 6 m durch Querrillen der Betonplattenwechsel unterbrochen. Durch die Querrillen kommt es zur Anregung des Fahrzeugaufbaus in vertikaler Richtung. Dies entspricht bei einer konstanten Fahrzeuggeschwindigkeit von 160 km/h einer An-

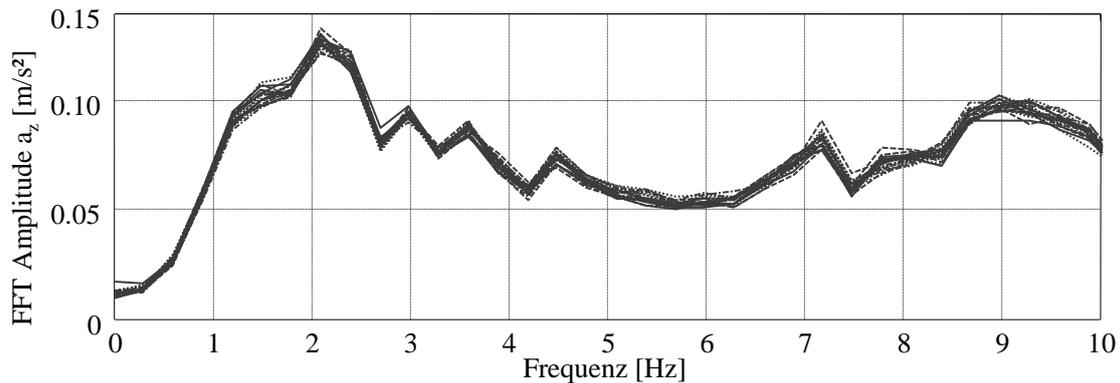


Abbildung 4.10.: Frequenzanalyse der Vertikalbeschleunigung  $a_z$  aus zwanzig Messungen auf der genutzten Versuchsstrecke

regungsfrequenz der Störgröße von 7.4 Hz an einer Achse. Die Anregungsfrequenz der Störgröße ist somit deutlich außerhalb des betrachteten Frequenzbereichs. Um auch bei der beschriebenen Versuchsdurchführung die Einflüsse natürlich auftretender Seitenwindböen zu minimieren, wurden die Fahrversuche nur bei mittleren Geschwindigkeit des natürlichen Winds kleiner 4 km/h am Versuchsgelände durchgeführt. Dies entspricht einer Windstärke  $B \leq 1Bft$ .

Aufgrund der genannten Störgrößen erfolgt der Abgleich zwischen Versuch und Simulation über die Übertragungsfunktion der Pendelkraft  $F_{y,P}$  zu einzelnen Kenngrößen der Fahrzeugreaktion im Frequenzbereich der Seitenkraft zwischen 0.5 bis 1.5 Hz. Dieser Frequenzbereich entspricht den Frequenzen hauptsächlich in der Natur auftretender Seitenwindböen sowie dem Frequenzbereich, in dem die Fahrzeugreaktion durch einen regelnden Eingriff des Fahrers über die Lenkung überhöht wird. Die Signalanalyse zur Auswertung des Versuchsergebnisse erfolgt dabei entsprechend Anhang A.1. Zunächst wird aus den Messergebnissen das Kreuzspektrum und das Autospektrum der Eingangsgröße X und Ausgangsgröße Y bestimmt. Die Anregung des Massependels ist dabei die Eingangsgröße X und die entsprechenden Werte der Fahrzeugreaktion die Ausgangsgröße Y. Zur Filterung etwaiger Störgrößen wird die Übertragungsfunktion TF (A.4) der Messreihen aus dem Quotienten des Kreuzspektrums und des Autospektrums berechnet. Dabei werden die Werte der ermittelten Übertragungsfunktion nur für Bewegungsgrößen genutzt, bei denen die Fahrzeugreaktion mit einer Kohärenz  $\gamma_{XY}^2(f) > 0.97$  auf die Anregung durch das Massenpendel zurückzuführen ist.

Bei den Messergebnissen der Fahrzeugreaktion unter Anregung mit einer Seitenkraft kleiner 30 N konnte kein Kohärenzkoeffizienten  $> 0.97$  ermittelt werden. Die zum Abgleich nutzbare minimale Anregungsfrequenz beträgt mit dem beschriebenen Versuchsaufbau somit je nach Bewegungsgröße in etwa 0.7 Hz.

Die Simulationsergebnisse wurden mit dem in Abschnitt 4.3 beschriebenen MKS-Programm bestimmt. Zur simulativen Abbildung wird das parametrisierte Fahrzeugmodell an der selben Position mit einem Seitenkraftsignal nach Gleichung 4.1 angeregt, an der das Massenpendel im realen Versuchsfahrzeug verbaut ist. Dabei beträgt die vorgegebene maximale Amplitude der Seitenkraft 100 N. Die Frequenz der Seitenkraft wird in der Simulation von 0 - 1.5 Hz variiert.

#### 4. Simulation der Fahrzeugantwort

Bestimmt man die Übertragungsfunktion der Seitenkraftanregung auf die Fahrzeugreaktion bei einer Variation der maximalen Amplitude der Aufgebrachten Seitenkraft zwischen 10 N und 200 N, lässt sich simulativ in der Mehrkörpersimulation kein Einfluss des Anregungsniveaus auf die Übertragungsfunktion bestimmen. Das Übertragungsverhalten des Fahrzeuges einer Querkraft dieser Größenordnung auf die Fahrzeugbewegung ist somit in der bestehenden simulativen Abbildung als linear dargestellt.

Die im Folgenden dargestellten Simulations- und Messergebnisse beziehen sich auf den untersuchten Fahrzeugtyp V3. Die Pendelmasse wurde bei der realen Versuchsdurchführung zwischen 7.0 kg, 8.2 kg und 11.9 kg variiert. Abbildung 4.11 zeigt einen Vergleich der Übertragungsfunktion TF aus Simulation und Fahrversuch. Hierbei wird die Übertragungsfunktion der Seitenkraft auf die Querbeschleunigung des Fahrzeugaufbaus aufgetragen.

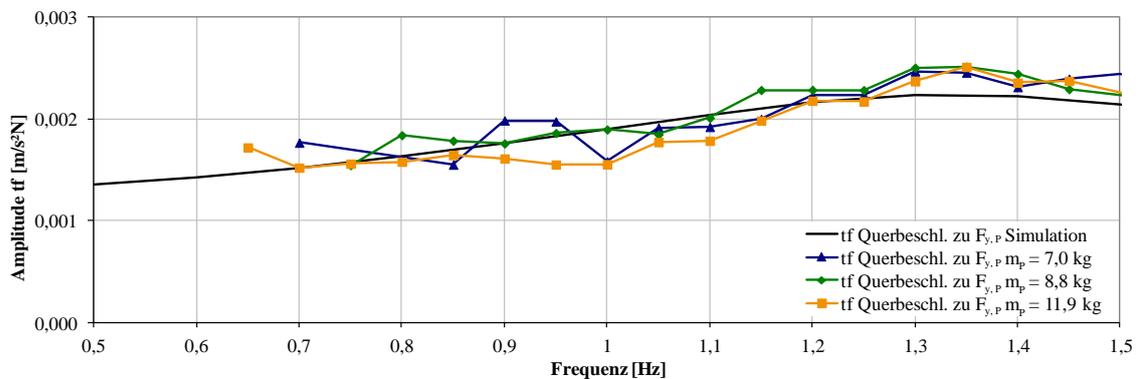


Abbildung 4.11.: Amplitude der TF  $F_{y,P}$  zu  $a_y$  aus Simulation und Fahrversuch

In Abbildung 4.12 ist der dazugehörige Phasenverzug der Übertragungsfunktion der Seitenkraft des Massependels und der Querbeschleunigung des Fahrzeugaufbaus aufgetragen.

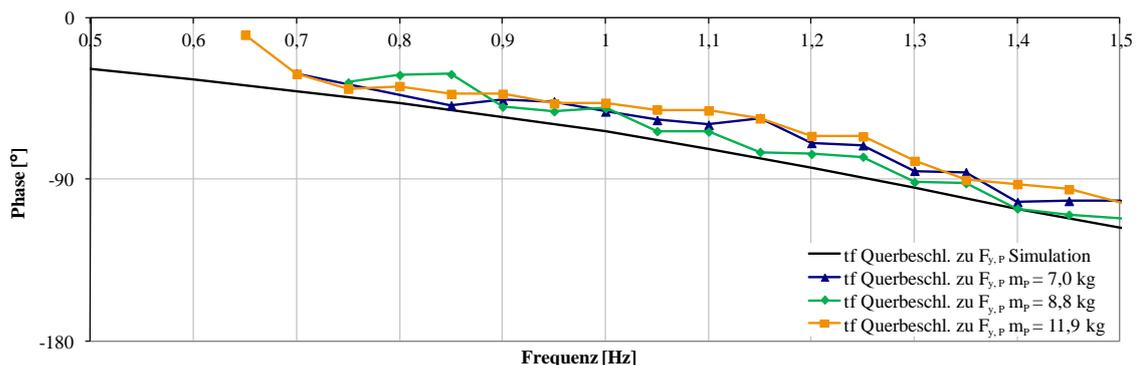


Abbildung 4.12.: Phase der TF  $F_{y,P}$  zu  $a_y$  aus Simulation und Fahrversuch

Betrachtet man die hierbei aufgezeigten Werte, so zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen den Simulations- und Messergebnissen. Die hierbei identifizierbaren Abweichungen liegen im Bereich der zu erwartenden Streuungen aufgrund des geringen Anregungsniveaus des Seitenkraftpendels. Auch die Werte des Phasenverzuges zeigen bei der Übertragungsfunktion der Seitenkraft des Massependels und der Querbeschleunigung eine gute Übereinstimmung.

Vergleicht man die Ergebnisse der Übertragungsfunktionen hinsichtlich Amplitudenverlauf und Phasenverzug für die einzelnen Anregungsniveaus in Abhängigkeit der Masse des verbauten Pendels, so lässt sich keine Abhängigkeit der hierbei ermittelten Werte von der Pendelmasse feststellen. Eine Reihung der Übertragungsfunktionen in Abhängigkeit des Anregungsniveaus kann hierbei nicht festgestellt werden. Die festzustellenden Abweichungen und Streuungen sind auch hierbei auf das vergleichsweise geringe Anregungsniveau des Massenpendels und somit auf den Störgrößeneinfluss der Messungen zurückzuführen. Abbildung 4.13 zeigt den Amplitudenverlauf der Übertragungsfunktion der Pendelkraft auf die resultierende Giergeschwindigkeit des Fahrzeugaufbaus.

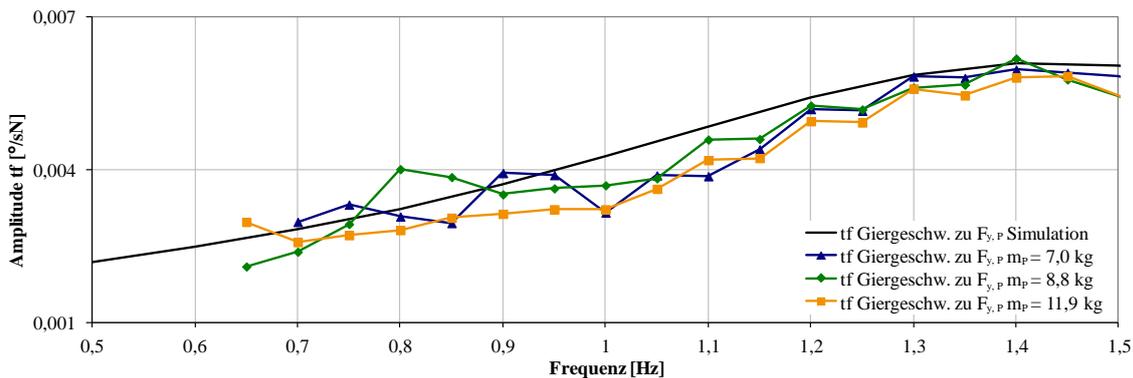


Abbildung 4.13.: Amplitude der TF  $F_{y,P}$  zu  $\dot{\psi}$  aus Simulation und Fahrversuch

In Abbildung 4.14 ist der dazugehörige Phasenverzug der Übertragungsfunktion der Seitenkraft des Massependels und der Giergeschwindigkeit des Fahrzeugaufbaus aufgetragen.

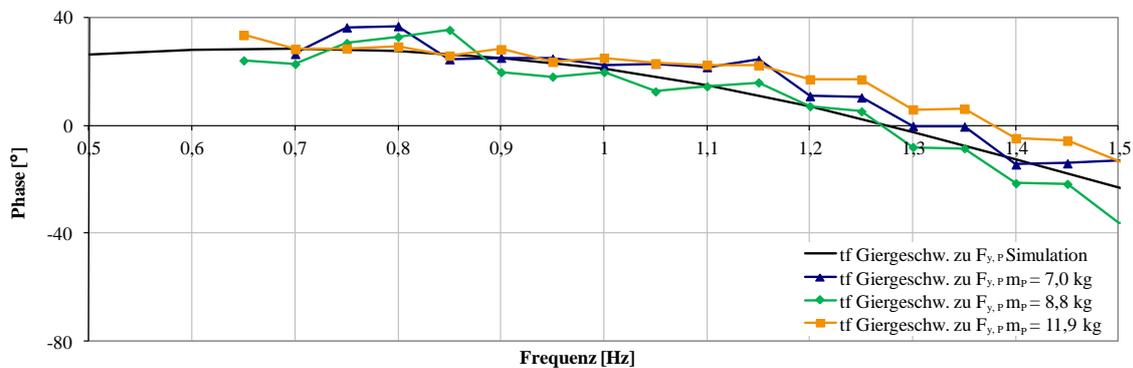


Abbildung 4.14.: Phase der TF  $F_{y,P}$  zu  $\dot{\psi}$  aus Simulation und Fahrversuch

Auch für den Amplitudenverlauf und Phasenverzug der Übertragungsfunktion von Pendelkraft und Giergeschwindigkeit des Fahrzeugaufbaus lässt sich eine gute Übereinstimmung zwischen Simulation und Messergebnissen feststellen. Abbildung 4.15 zeigt den Amplitudenverlauf der Übertragungsfunktion der Pendelkraft auf die Wankgeschwindigkeit des Fahrzeugaufbaus.

Zur Untersuchung des zeitlichen Übertragungsverhaltens zwischen Ein- und Ausgangsgröße wird auch hier der dazugehörige Phasenverzug der Übertragungsfunktion der Seitenkraft des Massependels und der Giergeschwindigkeit des Fahrzeugaufbaus in Abbildung 4.16 dargestellt.

#### 4. Simulation der Fahrzeugantwort

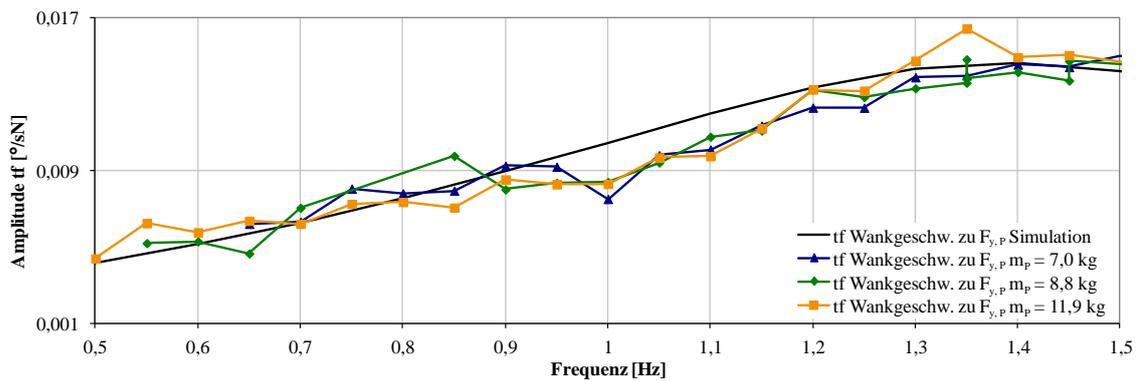


Abbildung 4.15.: Amplitude der TF  $F_{y,P}$  zu  $\dot{\varphi}$  aus Simulation und Fahrversuch

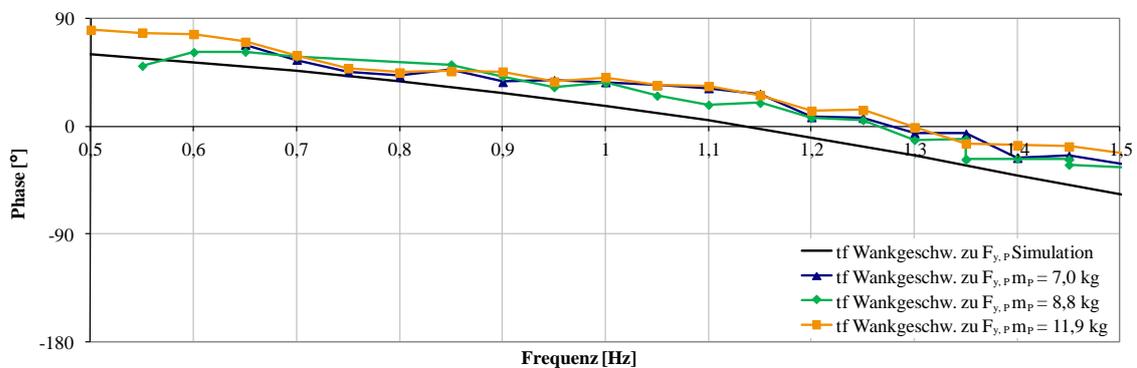


Abbildung 4.16.: Phase der TF  $F_{y,P}$  zu  $\dot{\varphi}$  aus Simulation und Fahrversuch

Auch für den Amplituden- und Phasenverlauf der Übertragungsfunktion der Pendelkraft auf die Wankgeschwindigkeit des Fahrzeugaufbaus lässt sich in Anbetracht des Anregungsniveaus des Massenpendels eine akzeptable Übereinstimmung zwischen Simulation und Fahrversuch darstellen. Betrachtet man den Phasenverzug zwischen Seitenkraftanregung und der Fahrzeugreaktion des Wankens, so lässt sich hier jedoch eine kontinuierliche Abweichung feststellen.

Betrachtet man die hier aufgezeigten Messergebnisse des Fahrversuchs, so lässt sich eine Abhängigkeit der Übertragungsfunktionen von der Pendelmasse und somit vom Anregungsniveau der Querkräfte nicht feststellen. Wie in der Simulation ist somit im Fahrversuch ein nicht-lineares Antwortverhalten der Fahrzeugreaktion in Abhängigkeit des Anregungsniveaus der Querkräfte nicht festzustellen. Da der Abgleich der Übertragungsfunktionen aus Simulation und Fahrversuch eine gute Übereinstimmung zeigt und die identifizierten Abweichungen zwischen Simulation und Versuch durch die unvermeidbaren Störgrößen der Versuchsdurchführung begründet sind, kann im Folgenden die Fahrzeugreaktion auf kleine Störgrößen in Querrichtung simulativ untersucht werden.

Zusammengefasst lässt sich feststellen, dass eine simulative Abbildung der Fahrzeugreaktion bei Anregungen auf dem Niveau einer Seitenwindanlage sowie der Fahrzeugreaktion bei Anregung durch geringe aerodynamische Anregung mittels der ausgewählten Simulationswerkzeuge realisierbar ist. Somit kann auch die Fahrzeugreaktion auf vergleichsweise kleine aerodynamische Anregungen simulativ bestimmt werden.

## 4.5. Simulationsergebnisse der Fahrzeugreaktion bei aerodynamischer Anregung

Die in diesem Kapitel beschriebenen und validierten Simulationswerkzeuge werden im Folgenden genutzt, um die Reaktionen der Personenkraftwagen aus Tabelle 4.1 auf unterschiedliche aerodynamischen Anregungen zu berechnen. Es wird dabei, wie in Abschnitt 3 definiert, die Fahrzeugreaktion auf eine Vorbeifahrt an der Seitenwindanlage, eine generische Seitenwindböe geringerer Anregungsamplitude ohne Vorzeichenwechsel sowie eine generischen Seitenwindböe mit Vorzeichenwechsel des Anströmwinkels untersucht.

Die folgenden Simulationsergebnisse wurden mit ADAMS/CAR<sup>®</sup> berechnet. Dabei wurde die Fahrzeugreaktion ohne den Einfluss der Lenkwinkleingabe durch den Fahrer, somit in einem Open-Loop Manöver, bei festgehaltenem Lenkradwinkel (fixed-control) berechnet. Der Wert des konstanten Lenkradwinkels sowie der Gaspedalstellung wird im Rahmen der Manöversimulation so vorgegeben, dass eine Geradeausfahrt des virtuellen Fahrzeuges bei konstanter Geschwindigkeit vor Auftreten der aerodynamischen Störung realisiert wird. Als Streckenprofil wird eine standardisierte Straßenoberfläche ohne explizites, vertikales Anregungsprofil vorgegeben.

Um die Unterschiede der Fahrzeugreaktion bei aerodynamischer Anregung quantifizieren zu können, werden Maximal- und Minimalwerte von Signalen der Fahrzeugantwort als charakteristische Werte der Fahrzeugbewegung, sogenannte CVs ermittelt (4.2).

$$CV_{max(a_y)} = max(a_y(t)) \quad (4.2)$$

Durch die Gegenüberstellung der Orts-, Geschwindigkeits- und Beschleunigungsgrößen der Fahrzeugreaktion, lassen sich die Unterschiede des Störungsverhaltens der betrachteten Personenkraftwagen identifizieren.

### 4.5.1. Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage

Zunächst werden die Simulationsergebnisse der Fahrzeugreaktion bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage genauer betrachtet. Die virtuelle Seitenwindanlage strömt dabei das Fahrzeug mit einer mittleren Geschwindigkeit von 78 km/h an. In diesem Beispiel beträgt die konstante Fahrzeuggeschwindigkeit 160 km/h. Die folgende Abbildung 4.17 zeigt den Zeitverlauf ausgewählter Kenngrößen des Simulationsergebnisses der Fahrzeugreaktion bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage entsprechend des in Abbildung 3.3 (a) beschriebenen Verlaufs des Anströmwinkels.

Betrachtet man den zeitlichen Verlauf der Fahrzeugreaktion, so zeigt sich ein unmittelbarer Anstieg der Bewegungsgrößen bei simulierter Einfahrt in die Seitenwindanlage. Dies ist auf die vereinfachte Abbildung der Seitenwindanlage als quasi-stationäre Anregung zurückzuführen. Durch die Berechnung der aerodynamischen Kräfte und Momente aus dem stationären Kennfeld durch Vorgabe eines Anströmwinkelverlaufs ergibt sich ein simultaner Anstieg der Anregungsgrößen in den sechs Freiheitsgraden des Fahrzeugaufbaus. Die Wankgeschwindigkeit steigt mit einem kurzem Zeitverzug nach Einfahrt in die Seitenwindanlage an. Der Verlauf der Wankgeschwindigkeit resultiert aus der Überlagerung des Wankmoments der Zentrifugalkraft des Fahrzeugaufbaus, der aerodynamischen Seitenkraft und dem aerodynamischen Wankmoment. Das

#### 4. Simulation der Fahrzeugantwort

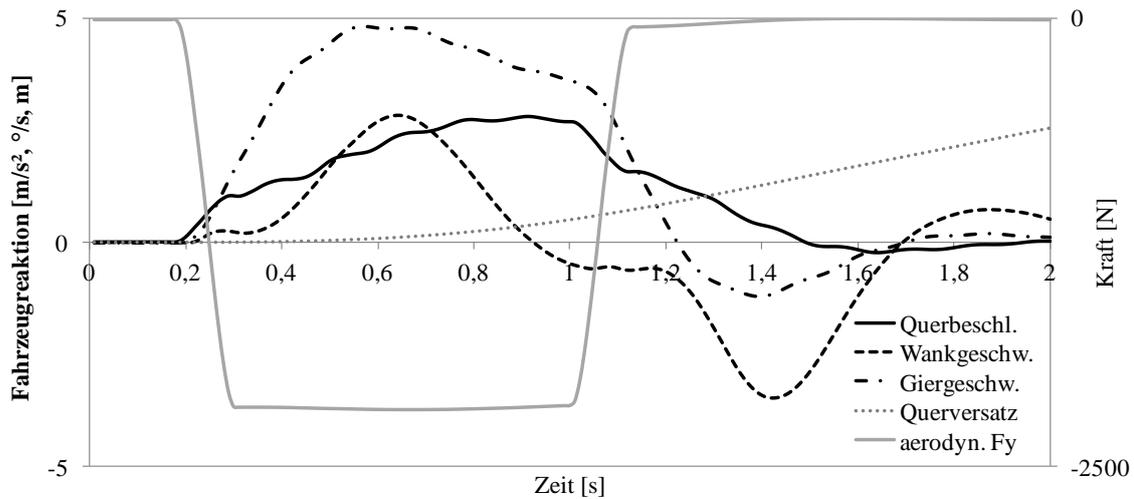


Abbildung 4.17.: Simulationsergebnis der Fahrzeugantwort bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage mit  $v_{fzg} = 160\text{km/h}$

Fahrzeug bewegt sich bei Anregung durch die Seitenwindanlage auf einer Kreisbahn von der aerodynamischen Störung weg. Da das Wankmoment der Zentrifugalkraft größer als das gegenläufige aerodynamische Wankmoment ist, wankt das Fahrzeug während der Vorbeifahrt an der Seitenwindanlage in Richtung der aerodynamischen Anströmung, somit in Luv-Richtung. Bei einer ausreichenden Verringerung der Fahrzeuggeschwindigkeit könnte während der Anregung der Seitenwindböe ein Wanken in Lee-Richtung gemessen werden.

Die Maximalwerte der Bewegungsgrößen treten in einer zeitlichen Reihenfolge zuerst für die Giergeschwindigkeit, dann für die Wankgeschwindigkeit und zuletzt für die Querbesehleung auf. Nach Wegfall der Seitenwindanregung zeigt ein negativer Wert der Wankgeschwindigkeit das Zurückschwingen des Fahrzeugaufbaus in einen nivellierten Zustand. In Abbildung 4.18 wird die Fahrzeugantwort der in Tabelle 4.1 beschriebenen Fahrzeug- und Fahrwerksarchitekturen bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage mit  $v_{Fzg} = 160\text{km/h}$  gegenübergestellt. Es werden dabei die CVs der maximalen Querbesehleung, Giergeschwindigkeit, minimalen und maximalen Wankgeschwindigkeit sowie des Querversatzes zum Zeitpunkt  $t_q$  aufgeführt. Die CVs der Fahrzeugantwort sind dabei auf die CVs des Fahrzeugs V1 normiert.

Bei Betrachtung der hier aufgetragenen CVs werden die unterschiedlichen Fahrzeugreaktionen bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage deutlich. Die Unterschiede sind dabei auf die verschiedenen, für die aerodynamischen Anregungsgrößen entscheidenden Fahrzeugformen, Fahrzeuggene, Fahrwerksarchitekturen und Reifeneigenschaften zurückzuführen. Die Einflüsse aerodynamischer Kenngrößen auf die Fahrzeugreaktion werden in Kapitel 5 sowie die Einflüsse von Fahrzeug- und Fahrwerkskenngrößen in Kapitel 6 detailliert erläutert. Die Gegenüberstellung der Fahrzeugreaktionen bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage soll zunächst nur die Varianz des Seitenwindverhaltens von Personenkraftwagen bei Starkwinden verdeutlichen. Gerade die CVs der minimalen Wankgeschwindigkeit variieren bei der betrachteten Fahrzeugauswahl in einem Bereich des 0.6-fachen bis 2.2-fachen im Vergleich zu Fahrzeug V1.

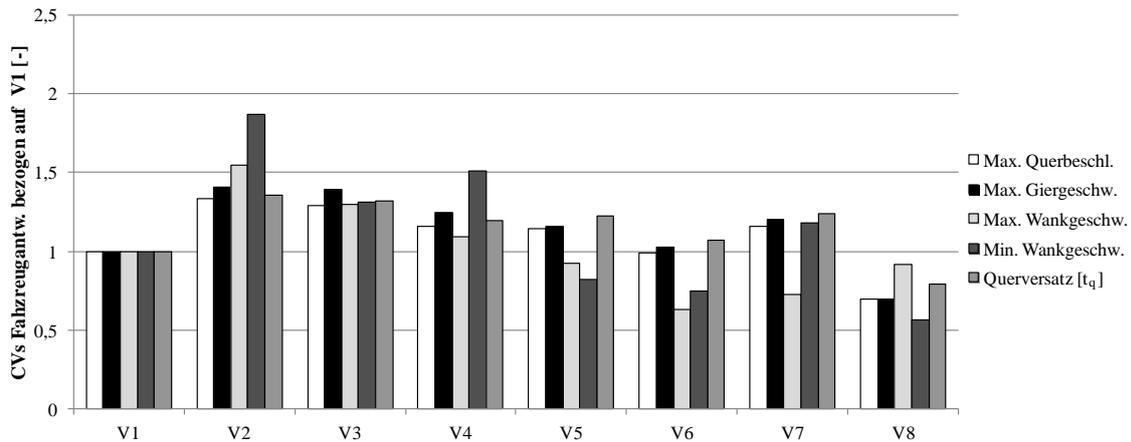


Abbildung 4.18.: Vergleich der Fahrzeugreaktion der untersuchten Fahrzeuge bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage bezogen auf Fahrzeug V1

### 4.5.2. Generische Seitenwindböe

Im Vergleich zur Fahrzeugbewegung bei Vorbeifahrt an der Seitenwindanlage ist in Abbildung 4.19 der Zeitverlauf der Fahrzeugantwort auf eine Anregung mit einer transienten Seitenwindböe ohne Vorzeichenwechsel des Anströmwinkels entsprechend Abbildung 3.3 (b) dargestellt. Der Anströmwinkel variiert bei der vorliegenden Anregung von  $\tau = 0^\circ$  zu  $-6^\circ$  und wieder zu  $0^\circ$ .

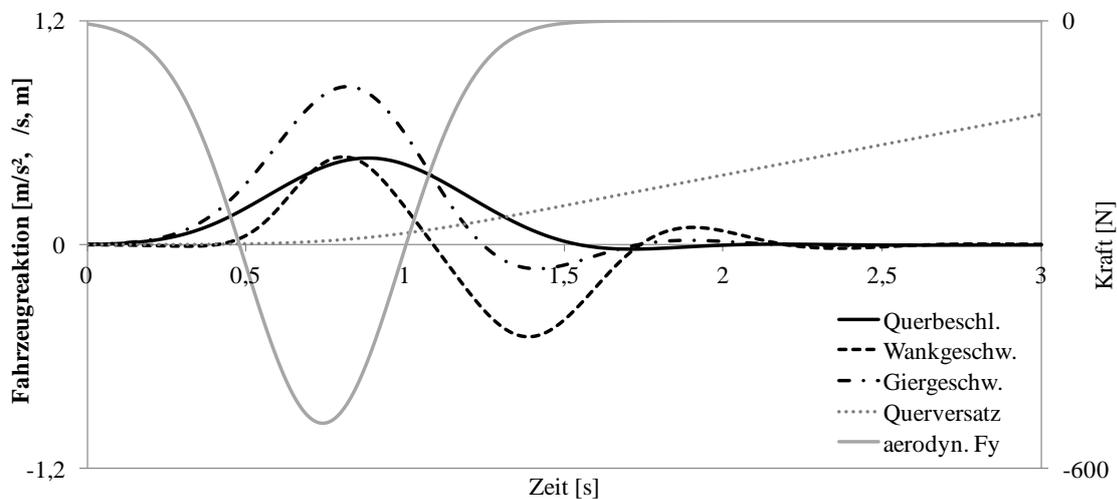


Abbildung 4.19.: Simulationsergebnis der Fahrzeugantwort bei Anregung durch eine generische Böe ohne Vorzeichenwechsel des Anströmwinkels mit  $v_{fzg} = 160\text{km/h}$

Auch hier steigen die aerodynamischen Anregungsgrößen der Querbeschleunigung und der Giergeschwindigkeit mit Auftreffen der Seitenwindböe an. Mit einem Zeitverzug von zirka 0.4s steigt auch die Wankgeschwindigkeit des Fahrzeugs an. Die Wankgeschwindigkeit ist auch hier ein Resultat aus dem Wankmoment der Zentrifugalkraft des Fahrzeugaufbaus, der aerodynamischen Seitenkraft und der Anregung durch das aerodynamische Wankmoment. Das Fahrzeug

#### 4. Simulation der Fahrzeugantwort

wankt hier während der Anregung der Seitenwindböe in Luv-Richtung. Dies ist wiederum auf das deutlich größere Wankmoment der Zentrifugalkraft zurückzuführen. Nach dem Wegfall der Seitenwindanregung zeigt sich bei der quasi-stationären Böe ein Zurückschwingen des Fahrzeugaufbaus in einen nivellierten Zustand. Zwischen der Anregung und den Bewegungsgrößen der Fahrzeugantwort lassen sich unterschiedliche Zeitverzögerungen feststellen.

Die Reihenfolge des zeitlichen Auftretens der Maximalwerte lässt sich wie folgt beschreiben. Die Maximalwerte der Giergeschwindigkeit und der Wankgeschwindigkeit treten nahezu gleichzeitig auf. Zuletzt tritt auch hier die maximale Querbeschleunigung auf. Abbildung 4.20 zeigt einen Vergleich der Fahrzeugantwort für die in Tabelle 4.1 beschriebenen Fahrzeuge bei Anregung mit der generischen Seitenwindböe ohne Vorzeichenwechsel. Die CVs der Fahrzeugantwort sind hierbei wiederum auf die CVs des Fahrzeugs V1 normiert.

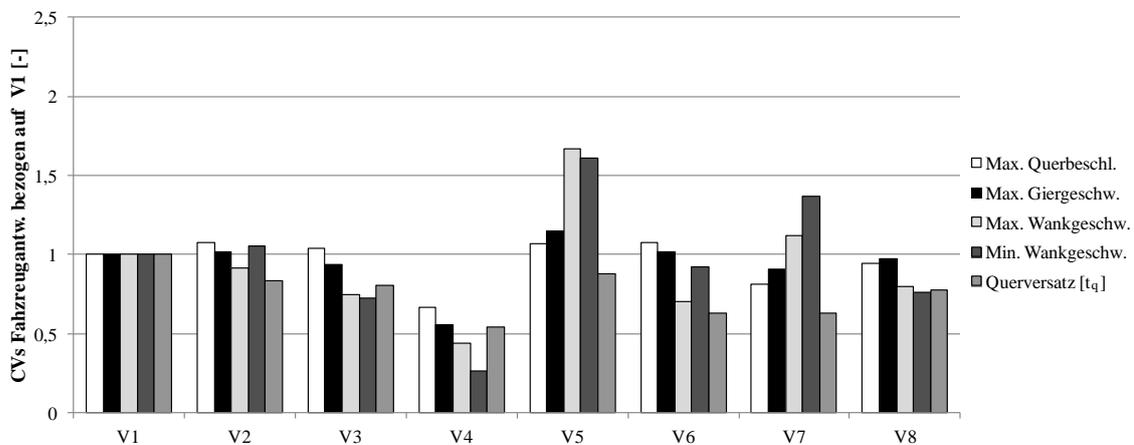


Abbildung 4.20.: Vergleich der Fahrzeugantwort der untersuchten Fahrzeuge auf eine generische Seitenwindböe ohne VZW bezogen auf V1

Bei Gegenüberstellung der Reaktionen der Fahrzeuge zeigt sich auch hier eine deutliche Streuung über die betrachteten Fahrzeug- und Fahrwerksarchitekturen. Die minimale Wankgeschwindigkeit streut hierbei zwischen dem 0.3-fachen und 1.6-fachen der minimalen Wankgeschwindigkeit des Fahrzeuges V1.

#### 4.5.3. Generische Seitenwindböe bei konstanter Anströmung

In Abbildung 4.21 ist der Zeitverlauf der Fahrzeugantwort auf eine Anregung mit einer generischen, transienten Seitenwindböe mit Vorzeichenwechsel des Anströmwinkels entsprechend Abbildung 3.3 (c) aufgetragen. Der Anströmwinkel variiert hierbei von  $\tau = 3^\circ$  zu  $\tau = -3^\circ$  und wieder zu  $\tau = 3^\circ$ . Dies wird durch den Verlauf der aerodynamischen Seitenkraft deutlich.

Auch hier wankt das Fahrzeug während der Anregung der Seitenwindböe in Luv-Richtung. Der Peak der Wankbewegung nach dem Wegfall der aerodynamischen Anregung in Lee-Richtung ist auf die Wankbewegung des Fahrzeugaufbaus in die Ausgangslage zurückzuführen. Vergleicht man den hier dargestellten Zeitverlauf mit der Fahrzeugreaktion auf eine Seitenwindböe ohne VZW in Abbildung 4.19, so zeigen sich höhere Amplitudenwerte der Gier- und Wankgeschwindigkeit. Vor allem die minimale Wankgeschwindigkeit der Fahrzeugreaktion ist deutlich höher.

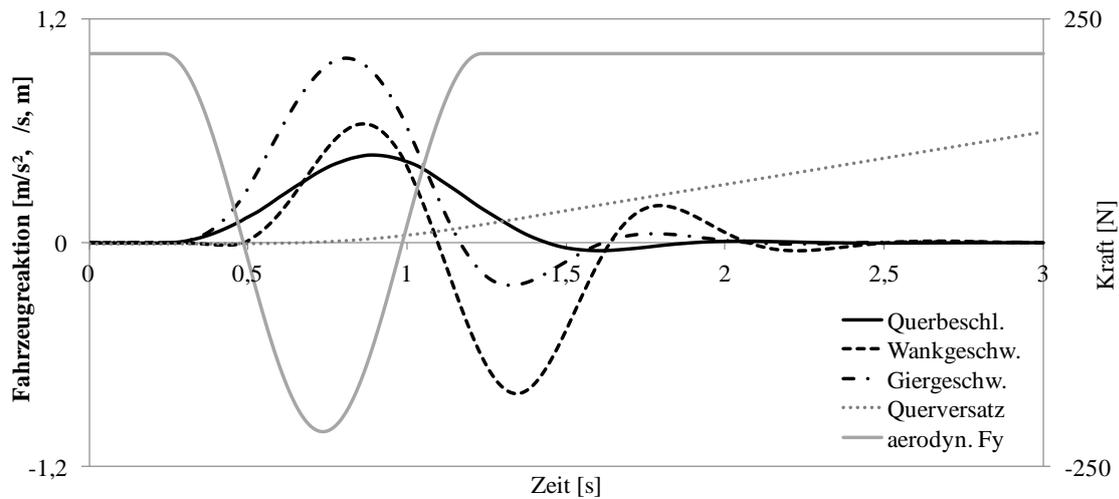


Abbildung 4.21.: Simulationsergebnis der Fahrzeugantwort bei Anregung durch eine generische Böe mit Vorzeichenwechsel des Anströmwinkels mit  $v_{fzg} = 160\text{km/h}$

Dies liegt am unterschiedlichen Ausgangszustand des Fahrzeugs bei stationärer Geradeausfahrt mit und ohne konstanter Seitenwindanströmung. Bei einer konstanten Seitenwindanströmung wird zur Realisierung der Geradeausfahrt ein konstanter Lenkwinkel vorgegeben. Durch die konstante aerodynamische Anregung und die Lenkwinkelvorgabe weist das Fahrzeug bei Geradeausfahrt einen konstanten Schwimmwinkel sowie Wankwinkel auf.

Der zeitliche Verlauf der Antwortgrößen zeigt auch hier einen unterschiedlichen Zeitverzug zwischen der Anregungsgröße und den Kenngrößen der Fahrzeugreaktion. Die zeitliche Reihenfolge der Maximalwerte entspricht hier erneut der Reihenfolge bei einer Vorbeifahrt an der Seitenwindanlage. Als Erstes tritt die maximale Giergeschwindigkeit auf, danach die maximale Wankgeschwindigkeit und zuletzt die maximale Querbeschleunigung. Die folgende Abbildung 4.22 zeigt einen Vergleich der Fahrzeugantwort für die in Tabelle 4.1 beschriebenen Fahrzeug- und Fahrwerksarchitekturen bei Anregung mit einer generischen aerodynamischen Böe mit Vorzeichenwechsel. Die CVs der Fahrzeugantwort sind dabei erneut auf die CVs der Fahrzeugantwort des Fahrzeugs V1 normiert.

Bei Analyse der in Abbildung 4.22 dargestellten CVs wird auch hier eine deutliche Streuung der Fahrzeugantwort über die unterschiedlichen Fahrzeugtypen ersichtlich. Die Fahrzeugreaktion variiert hierbei wieder vor allem bezüglich den CVs der minimalen Wankgeschwindigkeit. In Abhängigkeit der jeweiligen Fahrzeug- und Achsarchitekturen zeigt sich eine Streuung zwischen dem 0-5-fachen und 2,4-fachen im Vergleich zur minimalen Wankgeschwindigkeit von Fahrzeug V1.

## 4.6. Bewertung der Simulationsergebnisse

Da die Anregungsgrößen der generischen aerodynamischen Seitenwindböen im Vergleich zu anderen Querkräften herkömmlicher Fahrdynamikuntersuchungen vergleichsweise gering sind,

#### 4. Simulation der Fahrzeugantwort

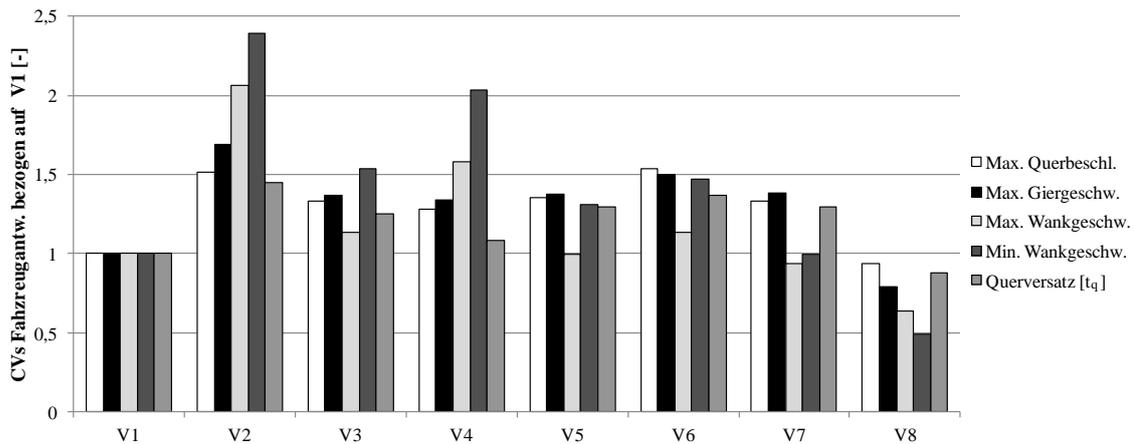


Abbildung 4.22.: Vergleich der Fahrzeugantwort der untersuchten Fahrzeuge auf eine generische Seitenwindböe mit VZW bezogen auf V1

gilt es, die Kenngrößen der Fahrzeugbewegung hinsichtlich der Fahrerwahrnehmung entsprechend 2.5 zu analysieren. Ohne Kenntnis der objektiven Kenngrößen der subjektiven Wahrnehmung des Seitenwindverhaltens kann dadurch eine Auswahl der relevanten CVs für eine Bewertung der Fahrzeugantwort erfolgen. Dabei ist zu prüfen, ob der Fahrer die auftretenden Bewegungsgrößen des Fahrzeugs mit den zur Verfügung stehenden Sinnen wahrnehmen kann.

Die CVs der Simulationsergebnisse wurden zunächst mit den Wahrnehmungsschwellen aus Abschnitt 2.5 abgeglichen. Dabei zeigt sich, dass die Amplituden der Längsbeschleunigung, Vertikalbeschleunigung und Nickgeschwindigkeit der Simulationsergebnisse bei Anregung mit der definierten generischen Seitenwindböe unterhalb der visuellen sowie vestibulären Wahrnehmungsschwellen der Bewegungsgrößen sind. Zudem sind die hierbei berechneten Lenkradmomente  $M_L$  unterhalb der definierten Wahrnehmungsschwelle für Lenkradmomente. Zur Bewertung der Einflussgröße aerodynamischer Anregungscharakteristika werden deshalb, vergleichbar den in der Literatur empfohlenen Kenngrößen aus Tabelle 2.6, die CVs der Querbeschleunigung, Gier- und Wankgeschwindigkeit betrachtet. Die Maxima der ausgewählten Signale können in Anbetracht der definierten Wahrnehmungsschwellen sowohl visuell als auch vestibulär durch den Fahrer bzw. durch die Fahrzeuginsassen wahrgenommen werden. Darüberhinaus übersteigt die minimale Wankgeschwindigkeit bei den Simulationsergebnissen die definierten Wahrnehmungsschwellen. Die CVs der minimalen Wankgeschwindigkeit werden somit in der vorliegenden Untersuchung auch betrachtet. Der Querversatz zu einem definierten Zeitpunkt  $t_q$  dient als Maß für den Geradeauslauf des Fahrzeuges.

Vergleicht man nun die Amplitudenwerte der Fahrzeugreaktionen bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage (SWA) in Abbildung 4.18 mit den Fahrzeugreaktionen auf eine generische, transiente Seitenwindböe ohne Vorzeichenwechsel (QSG1) in Abbildung 4.20 sowie den Fahrzeugreaktionen auf eine generische Seitenwindböe mit Vorzeichenwechsel (QSG2) in Abbildung 4.22, so sind die Unterschiede der Fahrzeugreaktionen innerhalb der betrachteten Fahrzeugauswahl von der Anregungsart abhängig.

Um diese für den Grundaulegungsprozess relevante Erkenntnis zu verdeutlichen, werden die Fahrzeuge entsprechend der CVs der Fahrzeugantwort in eine relative Bewertungsreihenfolge

von 1 bis 8 gebracht. Dabei ist Position 1 das Fahrzeug mit der niedrigsten Amplitude innerhalb der Fahrzeugauswahl. Geht man davon aus, dass eine möglichst geringe Amplitude der Fahrzeugantwort für die subjektive Wahrnehmung des Seitenwindverhaltens zielführend ist, wäre Position 1 somit das beste Fahrzeug und Position 8 das schlechteste Fahrzeug der betrachteten Fahrzeugauswahl. Die Reihung der Fahrzeuge wird für die Amplituden der maximalen Querbeschleunigung, Giergeschwindigkeit und Wankgeschwindigkeit durchgeführt. Daraus ergibt sich die in Tabelle 4.2 aufgezeigte Übersicht einer Bewertung der Fahrzeuge entsprechend der berechneten Amplitudenwerte.

Fzg.-Nr.	Maximale Querbeschleunigung			Maximale Giergeschwindigkeit			Maximale Wankgeschwindigkeit		
	SWA	QSG1	QSG2	SWA	QSG1	QSG2	SWA	QSG1	QSG2
V1	3	4	2	2	5	2	5	6	4
V2	8	7	7	8	7	8	8	5	8
V3	7	5	4	7	3	4	7	3	5
V4	6	1	3	6	1	3	6	1	7
V5	4	6	6	4	8	5	4	8	3
V6	2	8	8	3	6	7	1	2	6
V7	5	2	5	5	2	6	2	7	2
V8	1	3	1	1	4	1	3	4	1

Tabelle 4.2.: Position der Fahrzeuge innerhalb der Reihung der Fahrzeugauswahl nach Bewertung der Amplituden der Fahrzeugreaktion von klein (1) zu groß (8)

Bei Betrachtung der aufgeführten Positionen der Fahrzeuge innerhalb der Reihung, werden die Unterschiede bei einer relativen Bewertung des Seitenwindverhaltens deutlich. Die nach den Amplitudenwerten sortierte Reihung ist je nach Bewegungsgröße oder Anregungsart zum Teil deutlich unterschiedlich. Zum Beispiel variiert die Bewertung des Fahrzeuges V4 für die maximale Wankgeschwindigkeit zwischen Position 1, bei Anregung durch die quasi-stationäre Böe ohne VZW, und Position 6 bei Anregung durch die Seitenwindanlage. Die relative Bewertung des Seitenwindverhaltens über die maximale Wankgeschwindigkeit bei Anregung durch eine Seitenwindanlage würde somit zur Einschätzung eines guten Störungsverhaltens des Fahrzeuges führen, obwohl eine relative Bewertung bei Anregung durch Seitenwindböen geringer Anregungsamplituden auf ein eher schlechtes Störungsverhalten des Fahrzeuges schließen lässt. Dies verdeutlicht die Notwendigkeit im Grundaulegungsprozess von Personenkraftwagen, das Seitenwindverhalten, neben der Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage, bei den hauptsächlich auftretenden, kleineren Seitenwindanregungen zu untersuchen.

Zudem variiert die Position der ausgewählten Fahrzeuge über die hier aufgeführten Kenngrößen der Fahrzeugantwort. Zum Beispiel variiert die relative Bewertung des Fahrzeuges V3 für die maximale Querschleunigung und maximale Giergeschwindigkeit bei Anregung durch eine generische Böe zwischen Position 3 und Position 5. Hierbei stellt sich die Frage, welche der durch den Fahrer wahrnehmbaren, vestibulären Kenngrößen der Fahrzeugantwort die relevante Größe für die subjektive Empfindung ist. Diese Fragestellung wird für Fahrzeugreaktionen im Bereich der Wahrnehmungsschwelle über einen Ansatz der Objektivierung in Kapitel 7 untersucht. Zunächst gilt es jedoch die Einflussgröße der Charakteristika instationärer, aerodynamischer Anregungen auf die Fahrzeugreaktion genauer zu betrachten.

## 5. Einfluss instationärer Kenngrößen auf die Fahrzeugreaktion

Im Folgenden wird der Einfluss der in der Literatur beschriebenen Charakteristika instationärer, aerodynamischer Anregungen auf die Fahrzeugreaktion untersucht. Da die Abbildung instationärer Effekte bei der Ein- und Ausfahrt an einer Seitenwindanlage, über die Anpassung des Verlaufs des Giermoments, nur geringfügige Änderungen der Fahrzeugreaktion hervorrufen [57], wird hier der Einfluss instationärer aerodynamischer Effekte anhand der generischen Seitenwindböe betrachtet. Dazu wird die allgemeine Auswirkung von Amplitudenänderungen und Zeitverzügen von Kenngrößen der aerodynamischen Anregung der unter Kapitel 3 beschriebenen generischen Seitenwindböe auf das Störungsverhalten von Kraftfahrzeugen nach [72] untersucht. Da in der Literatur bei Seitenwindböen mit Vorzeichenwechsel deutlich höhere, instationäre Effekte identifiziert werden, werden im Folgenden derartige Anregungen detaillierter betrachtet.

Das Fahrzeugverhalten wird dabei durch Vorgabe aerodynamischer Anregungen simulativ mit der MKS-Modellierung aus Abschnitt 4.3 ermittelt. Zur Auswertung des Einflusses aerodynamischer Kenngrößen werden die Fahrzeugreaktionen bei Änderungen der Amplituden bzw. der Zeitverzüge einzelner Anregungssignale sowie kombinierter Änderungen der generischen, aerodynamischen Böe gegenübergestellt. Dazu werden die ermittelten CVs der einzelnen Manöversimulationen verglichen. Zur Auswertung der Einflussanalyse werden, wie in Abschnitt 4.5 beschrieben, die Kenngrößen der maximalen Querbeschleunigung, Gier- und Wankgeschwindigkeit sowie der minimalen Wankgeschwindigkeit betrachtet. Die Querabweichung  $p_y$  zu einem definierten Zeitpunkt  $t_q$  dient dabei als Maß der Abweichung des Fahrzeuges von der Solltrajektorie. Bei den folgenden Untersuchungen wird für die Einflussanalyse aerodynamischer Anregungen das Modell des Fahrzeugs V3 aus Abschnitt 4.1 betrachtet.

Um den Einfluss einer Änderung der generischen aerodynamischen Anregung entsprechend instationärer Charakteristika quantifizieren zu können, wird ein Koeffizient der Fahrzeugantwort VRC definiert. Gleichung (5.1) zeigt die Berechnung des VRC für die maximale Querbeschleunigung.

$$VRC_{max(a_y)} = \frac{\max(a_{y,USG_i}(t))}{\max(a_{y,QSG}(t))} \quad (5.1)$$

Der spezifische Koeffizient der Fahrzeugantwort  $VRC_i$  wird dabei als Quotient eines Peakwertes der Fahrzeugantwort, eines CVs, auf die Anregung mittels einer spezifischen instationären Böe  $USG_i$  und des entsprechenden Peakwertes der Fahrzeugantwort auf die Anregung durch die vorgegebene generische transiente Böe bestimmt. Durch den Koeffizienten wird somit der Amplitudenunterschied der Fahrzeugantwort quantifiziert.

## 5.1. Abhängigkeit der Fahrzeugreaktion von der Amplitudenzusammensetzung

In der Literatur zeigen sich deutliche Überhöhungen der Amplituden instationärer, aerodynamischer Seitenwindböen im Vergleich zu quasi-stationären Betrachtungen. Im Folgenden wird auf den Einfluss von Amplitudenänderungen aerodynamischer Seitenwindböen auf die Fahrzeugreaktion eingegangen. Zur Änderung der aerodynamischen Anregungen werden die Kennlinien der betrachteten Kenngrößen mit einem Faktor multipliziert. Zunächst werden die Ergebnisse einer Einflussanalyse bei singulärer Anregungsänderungen aufgezeigt.

### 5.1.1. Einfluss einzelner Amplitudenänderungen

Betrachtet man die Änderung einzelner Amplituden der aerodynamischen Anregungsgrößen, so zeigen sich Unterschiede im Einfluss auf die Fahrzeugreaktion. In Abbildung 5.1 sind die Koeffizienten der Fahrzeugantwort VRC bei einer 10% Amplitudenerhöhung der aerodynamischen Kenngrößen einer generischen Seitenwindböe, mit einem Verlauf des Anströmwinkels von  $\tau = 0^\circ$  zu  $-6^\circ$  und wieder zu  $0^\circ$ , aufgetragen.

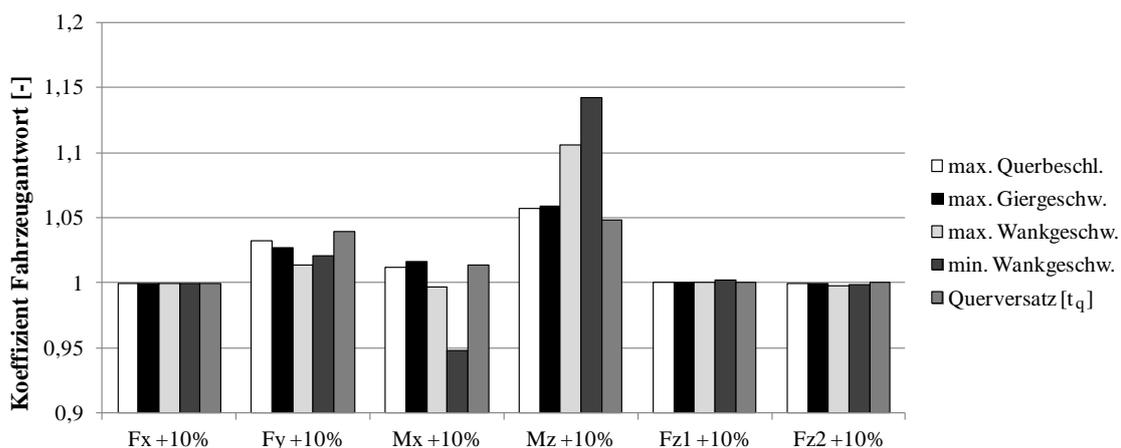


Abbildung 5.1.: Einfluss einer 10% Amplitudenerhöhung der aerodynamischen Kräfte und Momente einer generischen Seitenwindböe ohne Vorzeichenwechsel auf die Fahrzeugreaktion

Vergleicht man die hierbei aufgezeigte Änderung der Fahrzeugantwort bezüglich der maximalen Querbeschleunigung, Giergeschwindigkeit, maximalen sowie minimalen Wankgeschwindigkeit und den Querversatz zu einem definierten Zeitpunkt  $t_q$ , so lässt sich eine Hierarchie der Einflussgröße einzelner Anregungsgrößen auf die Fahrzeugantwort ableiten. Es zeigt sich, dass Amplitudenänderungen des Giermoments, der Seitenkraft und des Wankmoments den größten Einfluss auf die Fahrzeugantwort in dem durchgeführten Open-Loop Manöver aufweisen. Eine Überhöhung der Amplituden der aerodynamischen Längskraft sowie der aerodynamischen Auftriebskräfte zeigen keinen maßgeblichen Einfluss auf die Fahrzeugreaktion unter der Seitenwindstörung. Abbildung 5.2 zeigt die Koeffizienten der Fahrzeugantwort VRC bei einer 10%

Amplitudenerhöhung der aerodynamischen Kenngrößen einer generischen Seitenwindböe mit einem Verlauf des Anströmwinkels von  $\tau = 3^\circ$  zu  $-3^\circ$  und wieder zu  $3^\circ$ .

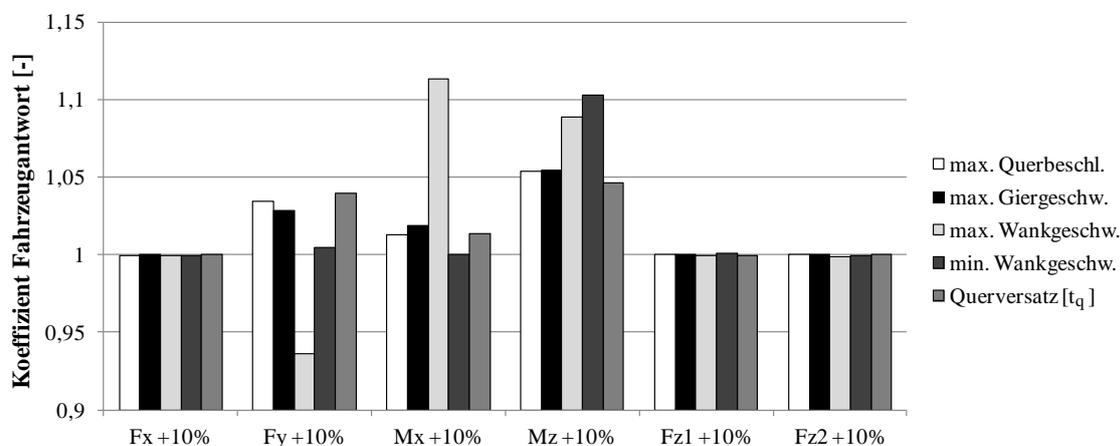


Abbildung 5.2.: Einfluss einer 10% Amplitudenerhöhung der aerodynamischen Kräfte und Momente einer generischen Seitenwindböe mit Vorzeichenwechsel auf die Fahrzeugreaktion

Auch hier ist die Einflussgröße einer Änderung einzelner aerodynamischer Anregungsgrößen auf die Fahrzeugreaktion unterschiedlich. Es zeigt sich erneut, dass Amplitudenänderungen des Giermoments, der Seitenkraft und des Wankmoments den größten Einfluss auf die Fahrzeugreaktion aufweisen. Änderungen der aerodynamischen Auftriebsbeiwerte zeigen erneut keinen signifikanten Einfluss auf die Fahrzeugreaktion.

Vergleicht man die VRCs der Amplitudenänderungen bei einer aerodynamischen, generischen Böe mit und ohne Vorzeichenwechsel, so zeigen sich hierbei nur Unterschiede bei der maximalen und minimalen Wankgeschwindigkeit. Dies ist durch die unterschiedlichen Fahrzeugzustände bei Geradeausfahrt vor Auftreffen der generischen Seitenwindböe begründet. Zur Realisierung der Geradeausfahrt mit einer konstanten seitlichen aerodynamischen Anströmung wird ein konstanter Lenkwinkel vorgegeben. Dies führt zu einem konstanten Schwimmwinkel des Fahrzeugs. Die Einflussgröße einer Amplitudenänderung auf die anderen CVs der Fahrzeugreaktion ist nahezu identisch.

Wie in Abschnitt 2.2.2 beschrieben, sind die Auftriebskräfte bei zusätzlichen Störgrößen, wie z.B. durch Bodenwellen, oder bei Kurvenfahrten unter einem Lastwechsel relevant. Da die hier durchgeführten Simulationen zur Bewertung des Störungsverhaltens auf ebener Fahrbahn und bei Geradeausfahrt durchgeführt werden, zeigt sich dieser Einfluss nicht. Aus den Erfahrungswerten des subjektiven Fahrversuchs ist zudem abzuleiten, dass Änderungen der Auftriebskräfte in einem Closed-Loop Manöver für das Führungsverhalten, vor allem für das instationäre Fahrverhalten beim Anlenken, als wichtige Kenngrößen zu identifizieren sind.

Da der Einfluss aerodynamischer Kräfte ab einem Geschwindigkeitsbereich von 120 km/h für die Fahrdynamik relevant ist, gilt es den Einfluss einer Änderung der aerodynamischen Anregungsgrößen in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit zu betrachten. In der folgenden Abbildung 5.3 ist der Einfluss einer 10% Amplitudenänderung auf die maximale Querbeschleunigung

## 5. Einfluss instationärer Kenngrößen auf die Fahrzeugreaktion

nigung, maximale Giergeschwindigkeit sowie auf die minimale und maximale Wankgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{Fzg}$  dargestellt. Die hierbei aufgebraachte Seitenwindböe hat dabei jeweils eine maximale Seitenwindgeschwindigkeit von 4 m/s. Die konstante Fahrzeuggeschwindigkeit wurde dabei in den einzelnen Simulationsmanövern zwischen 120 und 200 km/h variiert.

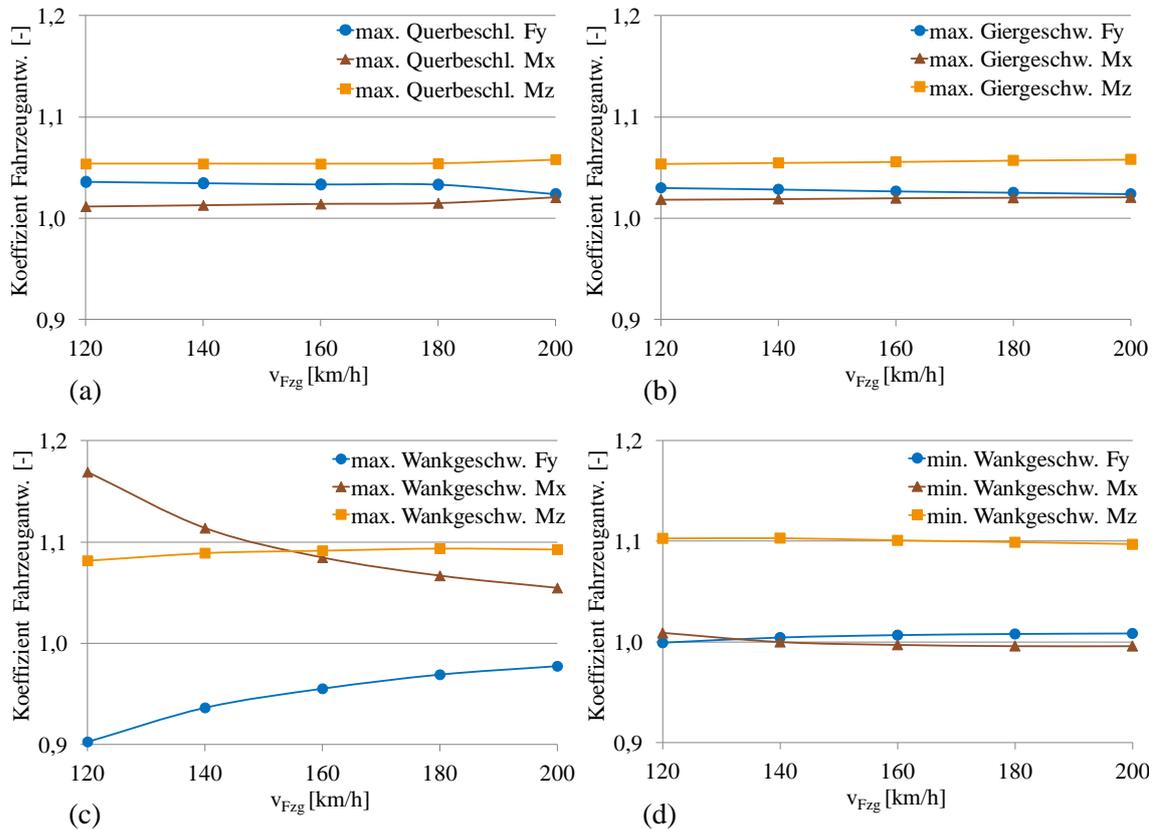


Abbildung 5.3.: Abhängigkeit des Einflusses einer Amplitudenänderung von  $v_{Fzg}$  auf (a) max. Querbeschleunigung und (b) Giergeschwindigkeit sowie (c) max. und (d) min. Wankgeschwindigkeit

Betrachtet man Abbildung 5.3 (a) so zeigt sich, dass die VRCs für maximale Querbeschleunigung und Giergeschwindigkeit in Abhängigkeit der Fahrzeuggeschwindigkeit in Näherung konstant sind. Im Gegensatz dazu zeigt Abbildung 5.3 (b) einen nicht-linearen Einfluss über die Fahrzeuggeschwindigkeit einer Anregungsänderung der aerodynamischen Seitenkraft und des aerodynamischen Wankmoments auf die maximale Wankgeschwindigkeit. Diese nicht-lineare Abhängigkeit kann durch das in Abschnitt 2.3.1 beschriebene einfache Wankmodell erläutert werden. Betrachtet man Gleichung 2.29 für den Sonderfall der stationären Kreisfahrt, so wird die Abhängigkeit der Wankbewegung vom Einfluss der Änderung der aerodynamischen Seitenkraft  $F_y$  und des aerodynamischen Wankmomentes  $M_x$  über die Fahrzeuggeschwindigkeit entsprechend Abbildung 5.3 deutlich. Da der Einfluss der aerodynamischen Auftriebskräfte über den betrachteten Geschwindigkeitsbereich wie in Abbildung 5.2 konstant gering ist, wird die Geschwindigkeitsabhängigkeit in Abbildung 5.3 nicht dargestellt.

Zwar führt eine Steigerung der Fahrzeuggeschwindigkeit bei gleicher aerodynamischer Anregung zu einer Erhöhung der resultierenden Fahrzeugantwort, jedoch ist festzustellen, dass der relative Einfluss einer Amplitudenänderung der aerodynamischen Anregung bei höherer Fahrzeuggeschwindigkeit nicht überproportional ansteigt.

### 5.1.2. Einfluss kombinierter Amplitudenänderungen

Zusätzlich zur Einflussanalyse der Änderungen einzelner Amplitudenwerte der aerodynamischen Anregungsgrößen wird im Folgenden der Einfluss kombinierter Amplitudenänderungen betrachtet. Durch die Untersuchung multi-variater Amplitudenänderungen gilt es, mögliche nicht-lineare Abhängigkeiten der Fahrzeugantwort zu identifizieren. Dazu wurde eine kombinierte Amplitudenänderung des Giermoments, der Seitenkraft und des Wankmoments um +/- 80% der generischen Seitenwindböe realisiert. Zur Darstellung der Zusammenhänge werden jeweils die VRCs bei einer simultanen Änderung von zwei Anregungsgrößen in der Ansicht eines Oberflächendiagramms dargestellt. Die dritte Anregungsgröße ist dabei als konstant vorgegeben. In folgender Abbildung 5.4 sind die VRCs der Querbeschleunigung entsprechend der erläuterten Variation der Anregungsamplituden bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 160 km/h aufgezeigt. Hierbei sind die Zusammenhänge für eine generische Seitenwindböe mit Vorzeichenwechsel des Anströmwinkels dargestellt.

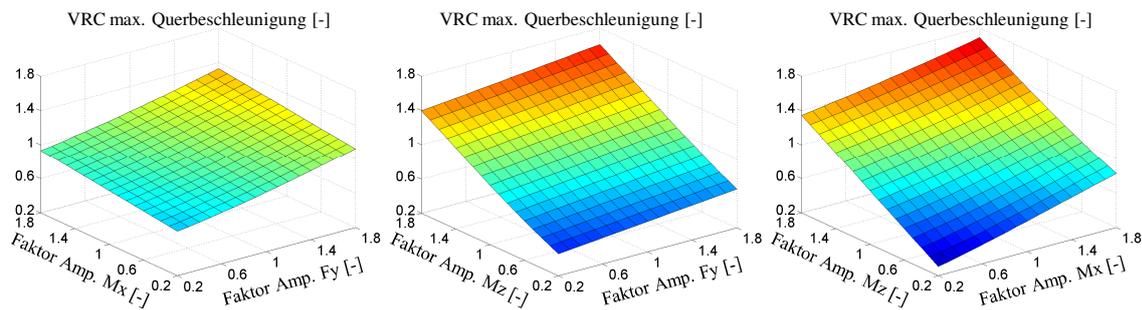


Abbildung 5.4.: Koeffizienten der Fahrzeugantwort für die max. Querbeschleunigung bei einer kombinierten Amplitudenänderung der aerodynamischen Anregungsgrößen bei  $v_{Fzg} = 160 \text{ km/h}$

Die Koeffizienten der Fahrzeugantwort für die maximale Querbeschleunigung zeigen eine lineare Abhängigkeit zu einer kombinierten Änderung der Amplituden der aerodynamischen Anregungsgrößen. Zur Quantifizierung und zur Vergleichbarkeit kann somit ein linearer Einflussfaktor  $EF_{ml}$  nach Gleichung (5.2) aus dem Quotienten der Änderung der Bewegungsgröße und der singulären Änderung einer Anregungskenngröße ermittelt werden.

$$EF_{ml} = \frac{\Delta CV_l}{\Delta AK_m} \quad (5.2)$$

Für die maximale Querbeschleunigung ergibt sich bei einer Änderung der Seitenkraft ein Einflussfaktor  $EF_{F_y, a_y} = 0.26$ , bei einer Änderung des Wankmoments ein Einflussfaktor  $EF_{M_x, a_y} = 0.13$  und bei einer Änderung des Giermoments ein Einflussfaktor  $EF_{M_z, a_y} = 0.60$ . Die hierbei berechneten Einflussfaktoren können als Maß für die Steigung der in Abbildung aufgezeigten

## 5. Einfluss instationärer Kenngrößen auf die Fahrzeugreaktion

Flächen betrachtet werden. Ein positiver Wert eines Einflussfaktors deutet auf eine Erhöhung, ein negativer Wert eines Einflussfaktors deutet auf eine Verringerung der Fahrzeugreaktion bei einer Erhöhung der jeweiligen Anregungsamplitude. Abbildung 5.5 zeigt den Einfluss einer kombinierten Amplitudenänderung der aerodynamischen Anregungsgrößen auf die maximale Giergeschwindigkeit der Fahrzeugreaktion.

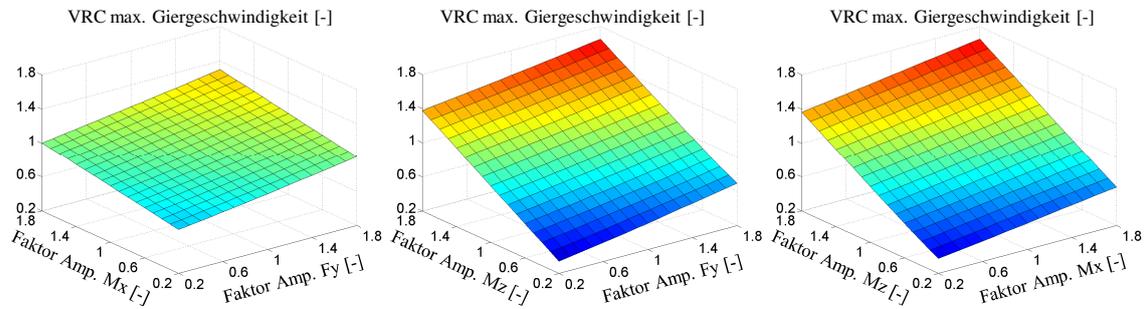


Abbildung 5.5.: Koeffizienten der Fahrzeugantwort für die max. Giergeschwindigkeit bei einer kombinierten Amplitudenänderung der aerodynamischen Anregungsgrößen bei  $v_{Fzg} = 160\text{km/h}$

Auch für die maximale Giergeschwindigkeit zeigt sich eine lineare Abhängigkeit der Bewegungsgröße von einer kombinierten Änderung der Amplituden der aerodynamischen Anregungsgrößen. Für die maximale Giergeschwindigkeit ergibt sich der Einflussfaktor  $EF_{F_y, \dot{\psi}} = 0.18$  bei einer Änderung der Seitenkraft,  $EF_{M_x, \dot{\psi}} = 0.18$  bei einer Änderung des Wankmoments und  $EF_{M_z, \dot{\psi}} = 0.63$  bei einer Änderung des Giermoments. Als Maß der Abweichung des Fahrzeugs von der Solltrajektorie wird in Abbildung 5.6 der Einfluss einer kombinierten Amplitudenänderung der aerodynamischen Anregungsgrößen auf den Querversatz des Fahrzeugs bei  $t_q$  dargestellt.

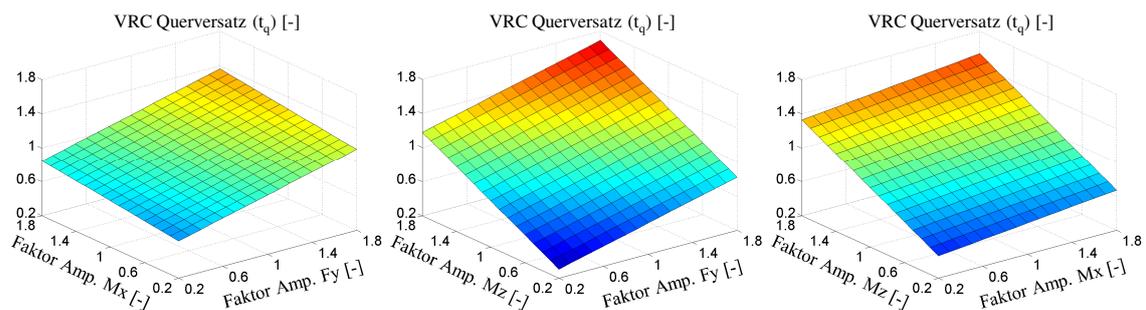


Abbildung 5.6.: Koeffizienten der Fahrzeugantwort für den Querversatz zum Zeitpunkt  $t_q$  bei einer kombinierten Amplitudenänderung der aerodynamischen Anregungsgrößen bei  $v_{Fzg} = 160\text{km/h}$

Die Koeffizienten der Fahrzeugantwort für den Querversatzes zu einem definierten Zeitpunkt  $t_q$  zeigen wiederum eine lineare Abhängigkeit von einer kombinierten Änderung der Amplituden der aerodynamischen Anregungsgrößen. Es ergibt sich bei einer Änderung der Seitenkraft ein Einflussfaktor  $EF_{F_y, p_y} = 0.32$ , bei einer Änderung des Wankmoments ein Einflussfaktor  $EF_{M_x, p_y} = 0.13$  und bei einer Änderung des Giermoments ein Einflussfaktor  $EF_{M_z, p_y} = 0.54$ .

## 5.1. Abhängigkeit der Fahrzeugreaktion von der Amplitudenzusammensetzung

In Tabelle 5.1 sind die Einflussfaktoren einer Änderung der Seitenkraft, des Wankmoments und Giermoments auf die maximale Querbeschleunigung, Giergeschwindigkeit sowie den Querversatz aufgeführt. Die Gegenüberstellung verdeutlicht erneut die vergleichsweise hohe Einflussgröße des Giermoments auf die Fahrzeugreaktion.

<b>Einflussfaktor</b> $EF_{ml}$ $v_{Fzg} = 160\text{km/h}$	<b>Einfluss auf <math>a_y</math></b>	<b>Einfluss auf <math>\dot{\psi}</math></b>	<b>Einfluss auf <math>p_y</math></b>
<b>aerodyn. Seitenkraft</b>	0.26	0.18	0.32
<b>aerodyn. Wankmoment</b>	0.13	0.18	0.13
<b>aerodyn. Giermoment</b>	0.60	0.63	0.54

Tabelle 5.1.: Übersicht der linearen Einflussfaktoren aerodynamischer Anregungsgrößen auf Kenngrößen der Fahrzeugreaktion des Fahrzeugs V3 bei  $v_{Fzg} = 160\text{km/h}$

In Abbildung 5.7 sind zudem die VRCs für die maximale und minimale Wankgeschwindigkeit als Resultat einer kombinierten Variation der Seitenkraft, des Wank- und Giermoments der generischen aerodynamischen Anregung dargestellt.

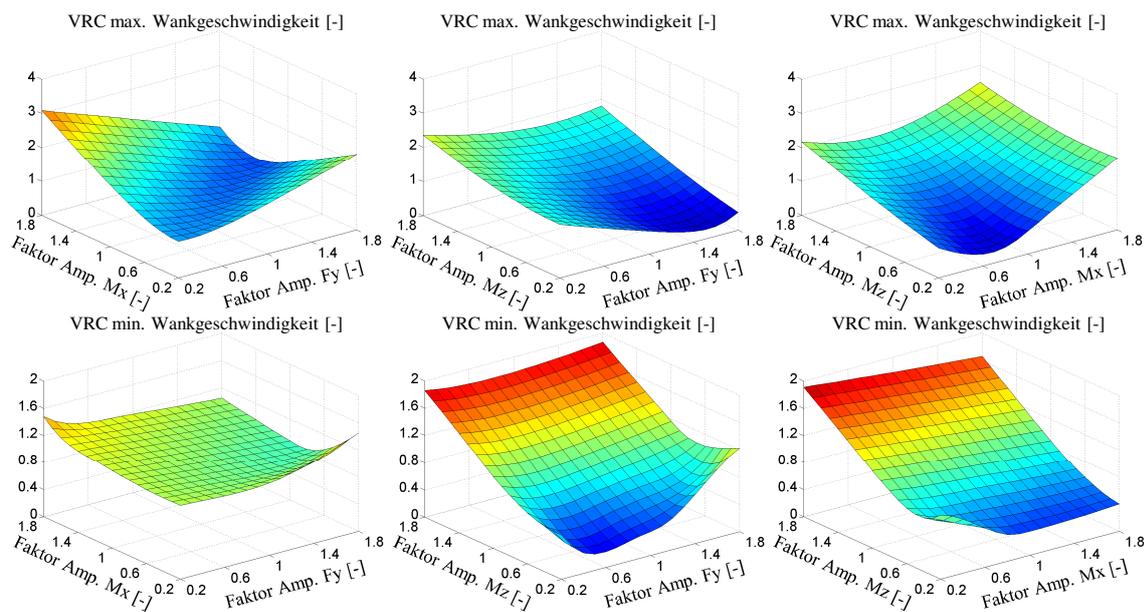


Abbildung 5.7.: Koeffizienten der Fahrzeugantwort für die max. und min. Wankgeschwindigkeit bei einer kombinierten Amplitudenänderung der aerodynamischen Anregungsgrößen bei  $v_{Fzg} = 160\text{km/h}$

Die maximale und minimale Wankgeschwindigkeit zeigt eine nicht-lineare Abhängigkeit von einer Amplitudenänderung der aerodynamischen Anregungsgrößen. Wie bereits erläutert, resultiert die Wankgeschwindigkeit aus der Überlagerung der Zentrifugalkraft des Fahrzeugaufbaus auf einer Kreisbahn, der Anregung durch eine aerodynamischen Seitenkraft und eines aerodynamischen Wankmoments. Da der aerodynamische Referenzpunkt nicht auf der Wankachse und

## 5. Einfluss instationärer Kenngrößen auf die Fahrzeugreaktion

auch nicht auf der Neutrallinie liegt, führt eine Amplitudenänderung der Seitenkraft zu einer Beeinflussung der maximalen und minimalen Wankgeschwindigkeit.

Zur Erläuterung der nicht-linearen Zusammenhänge werden im Folgenden die Zeitverläufe des Wankwinkels und der Wankgeschwindigkeit bei einer Änderung ausgewählter Anregungsgrößen aufgezeigt. In Abbildung 5.8 ist der Zeitverlauf des Wankwinkels (a) sowie der Wankgeschwindigkeit (b) bei einer Verringerung des aerodynamischen Wankmoments um 80% und einer Variation der aerodynamischen Seitenkraft um +/-80% aufgetragen.

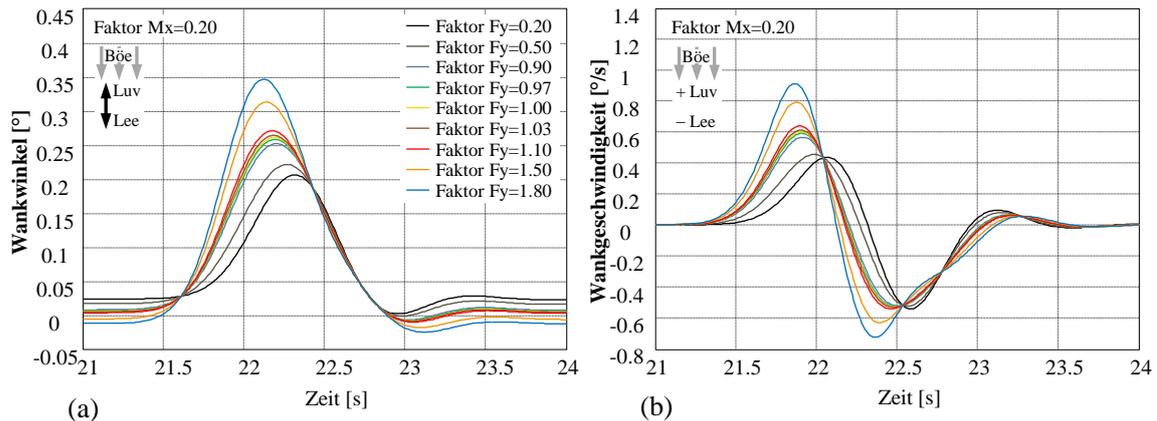


Abbildung 5.8.: Wankwinkel- (a) und Wankgeschwindigkeitsverlauf (b) bei Variation der Seitenkraft um +/-80% und einem 0.2-fachen Wankmoment bei  $v_{Fzg} = 160 \text{ km/h}$

Das Fahrzeug wankt hierbei in Luv-Richtung. Der aerodynamische Referenzpunkt liegt in Fahrzeuginnenrichtung vor der Neutrallinie. Ein Anstieg der aerodynamischen Seitenkraft verringert den Radius der Kreisbahn der Fahrzeugreaktion und erhöht die resultierende Zentrifugalkraft. Bei Erhöhung der Seitenkraft erfolgt zudem eine Verstärkung der Wankbewegung in Richtung der aerodynamischen Störung aufgrund der Lage des aerodynamischen Referenzpunkts unterhalb der Wankachse. Damit führt ein Anstieg der aerodynamischen Seitenkraft in Abbildung 5.7 zu einer Erhöhung der minimalen und maximalen Wankgeschwindigkeit. Die minimale Wankgeschwindigkeit ist dabei ein Resultat des Zurückwankens des Fahrzeugaufbaus in einen nivellierten Zustand. Abbildung 5.11 zeigt den Verlauf des Wankwinkels (a) sowie der Wankgeschwindigkeit (b) bei einer Verringerung der aerodynamischen Seitenkraft um 80% und einer Variation des aerodynamischen Wankmoments um +/-80%.

Bei einem geringen Amplitudenfaktor von 0.2 des aerodynamischen Wankmoments ist erneut eine Wankbewegung in Luv-Richtung festzustellen. Hierbei resultiert die minimale Wankgeschwindigkeit aus dem Zurückwanken in einen nivellierten Zustand des Fahrzeugaufbaus. Bei Erhöhung des aerodynamischen Wankmoments verringert sich die maximale Wankgeschwindigkeit geringfügig bis zur Richtungsänderung der Wankbewegung bei der aerodynamischen Seitenwindböe. Ab einem Faktor von zirka 0.3 erfolgt eine Wankbewegung in Lee-Richtung. Ab diesem Wert führt somit eine Erhöhung des aerodynamischen Wankmoments zu einem Anstieg der minimalen und maximalen Wankgeschwindigkeit. Hier ist nun die maximale Wankgeschwindigkeit auf das Zurückwanken in einen nivellierten Zustand zurückzuführen. Betrachtet man die Abhängigkeit der maximalen Wankgeschwindigkeit von den Amplituden der aerodyna-

## 5.1. Abhängigkeit der Fahrzeugreaktion von der Amplitudenzusammensetzung

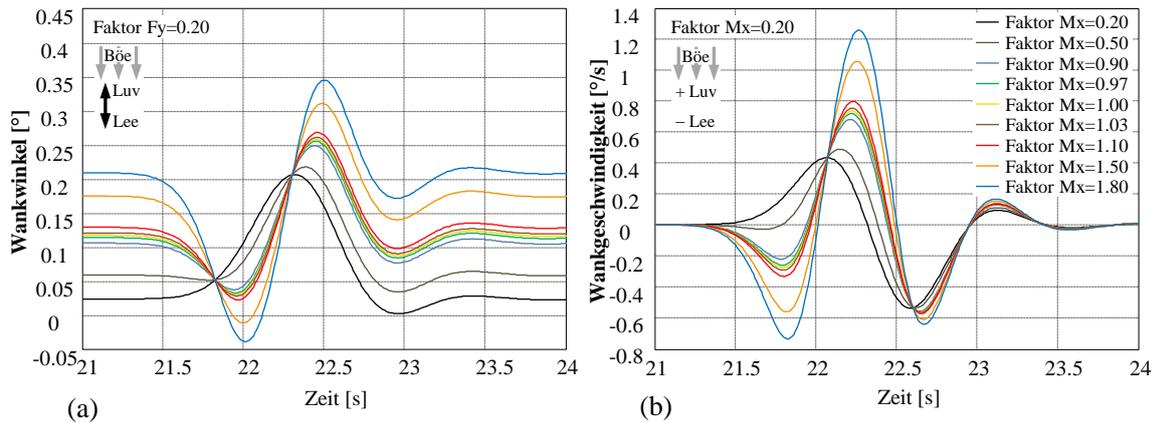


Abbildung 5.9.: Wankwinkel- (a) und Wankgeschwindigkeitsverlauf (b) bei Variation des Wankmoments um +/-80% und einer 0.2-fachen Seitenkraft bei  $v_{Fzg} = 160km/h$

mischen Seitenkraft und des aerodynamischen Wankmoments in Abbildung 5.7, so wird deutlich, dass bei höheren Amplituden der aerodynamischen Seitenkraft ein Wanken in Lee-Richtung erst bei höheren Faktoren des Wankmoments größer 0.3 festzustellen ist. In Abbildung 5.10 ist der Zeitverlauf des Wankwinkels (a) sowie der Wankgeschwindigkeit (b) bei einer Verringerung des aerodynamischen Wankmoments um 80% und einer Variation des Giermoments um +/-80% aufgetragen.

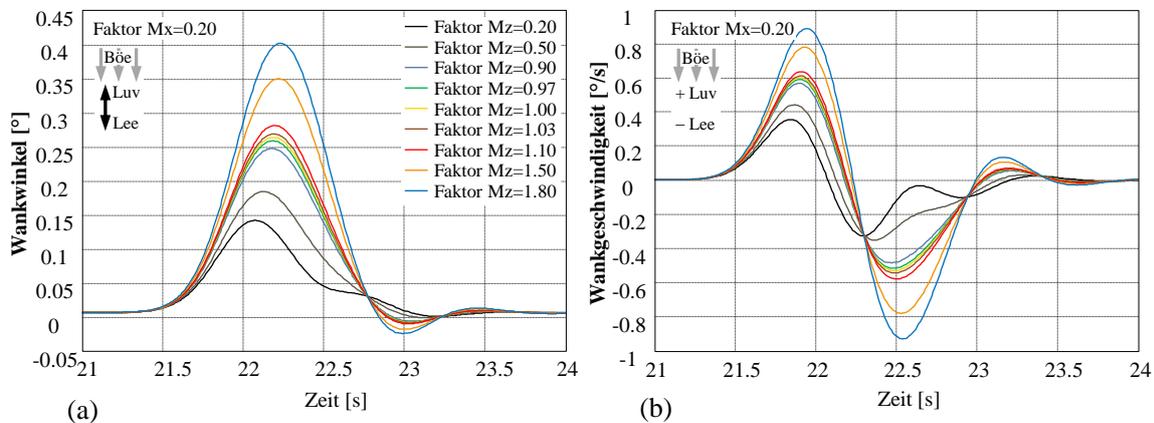


Abbildung 5.10.: Wankwinkel- (a) und Wankgeschwindigkeitsverlauf (b) bei Variation des Giermoments um +/-80% und einem 0.2-fachen Wankmoment bei  $v_{Fzg} = 160km/h$

Durch das geringe Wankmoment erfolgt die Wankbewegung bei den dargestellten Zeitverläufen in Richtung Luv-Seite. Das aerodynamische Giermoment bestimmt den Radius der kreisförmigen Bewegung des Fahrzeugs bei Anregung durch die aerodynamische Störung. Eine Erhöhung des Giermoments führt somit zu einer Erhöhung der resultierenden Zentrifugalkraft. Die Erhöhung des aerodynamischen Giermoments in Abbildung 5.7 führt somit zu einer Erhöhung der minimalen und maximalen Wankgeschwindigkeit. Abbildung 5.11 zeigt den Zeitverlauf des Wank-

## 5. Einfluss instationärer Kenngrößen auf die Fahrzeugreaktion

winkels (a) sowie der Wankgeschwindigkeit (b) bei einer Verringerung des aerodynamischen Giermoments um 80% und einer Variation des Wankmoments um +/-80%.

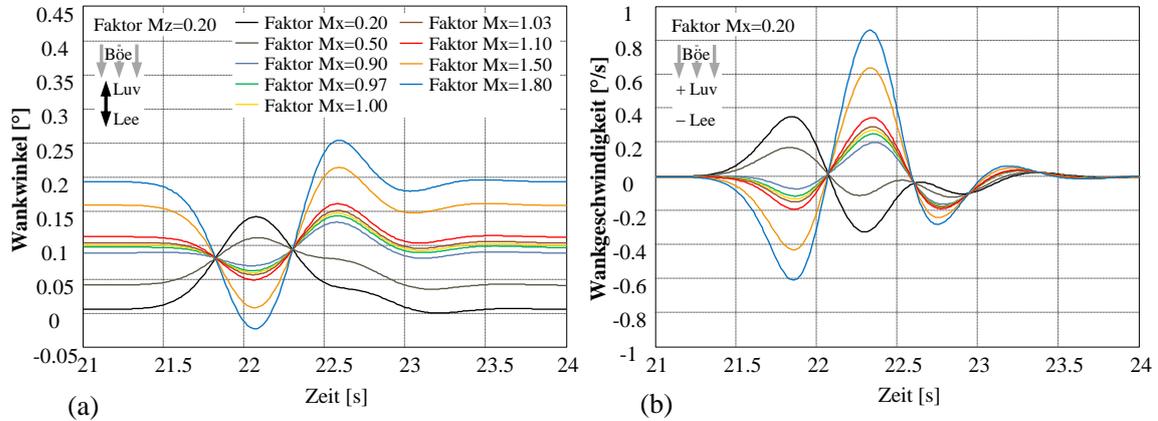


Abbildung 5.11.: Wankwinkel- (a) und Wankgeschwindigkeitsverlauf (b) bei Variation des Wankmoments um +/-80% und einem 0.2-fachen Giermoment bei  $v_{Fzg} = 160 \text{ km/h}$

Bei einem geringen aerodynamischen Giermoment und Wankmoment mit einem Amplitudenfaktor von 0.2 ist erneut eine Wankbewegung in Luv-Richtung festzustellen. Bei Erhöhung des aerodynamischen Wankmoments verringert sich die maximale Wankgeschwindigkeit bis zur Richtungsänderung der Wankbewegung. Ab einem Faktor von zirka 0.7 erfolgt eine Wankbewegung in Lee-Richtung. Ab einem Faktor von 0.7 des aerodynamischen Wankmoments ist somit ein Anstieg der maximale Wankgeschwindigkeit festzustellen. Bei einem höheren aerodynamischen Giermoment ist die Wankbewegung in Lee-Richtung bei einem höheren Faktor des aerodynamischen Wankmoments festzustellen. Dies wird bei Betrachtung der Abhängigkeit der maximalen Wankgeschwindigkeit von der Amplitude des aerodynamischen Giermoments und Wankmoments in Abbildung 5.7 deutlich.

Aufgrund der hier aufgezeigten nicht-linearen Zusammenhänge kann eine Erhöhung des aerodynamischen Wankmoments zu einer Verringerung der maximalen und minimalen Wankgeschwindigkeit führen. Da eine Erhöhung des Wankmoments jedoch zu einer Erhöhung der maximalen Querschleunigung und maximalen Giergeschwindigkeit führt, gilt es das Optimum für die subjektive Wahrnehmung des Fahrers zu identifizieren. Der Einfluss einer Amplitudenänderung einzelner aerodynamischer Kenngrößen auf die Wankbewegung ist aufgrund der kombinierten Zusammenhänge somit nicht ohne weiteres auf multivariate Amplitudenänderungen übertragbar.

Im vorherigen Abschnitt wurde kein signifikanter Einfluss einer singulären Änderung der Auftriebskräfte auf das Störungsverhalten der Fahrzeuge festgestellt. Im Folgenden wird nun der Einfluss kombinierter Änderungen der Auftriebskräfte an Vorder- und Hinterachse auf die Fahrzeugreaktion bei Störung durch eine generische aerodynamische Anregung mit Vorzeichenwechsel des Anströmwinkels untersucht. Die Abbildung 5.12 zeigt den Einfluss der Auftriebskraft  $F_{z1}$  an der Vorderachse und  $F_{z2}$  an der Hinterachse auf die VRCs der maximalen Querschleunigung

gung, Wankgeschwindigkeit und Giergeschwindigkeit. Die abgebildeten VRCs wurden in einem Manöver des Geradeauslaufs bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von  $v_{Fzg} = 160\text{km/h}$  ermittelt.

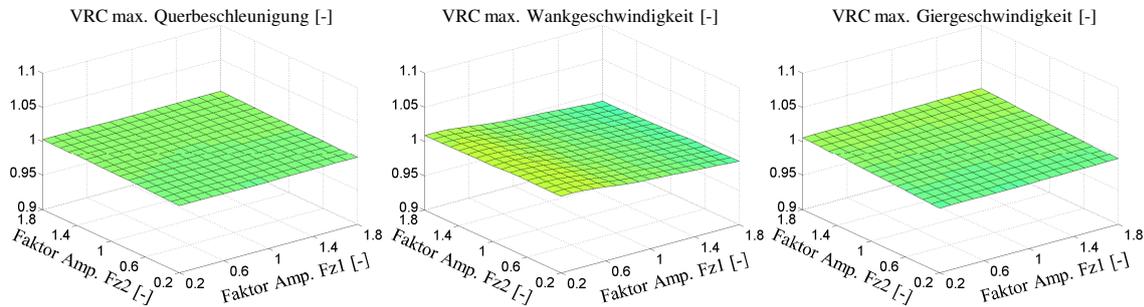


Abbildung 5.12.: Koeffizienten der Fahrzeugantwort einer kombinierten Änderung der aerodynamischen Auftriebskräfte der generischen Seitenwindböe bei  $v_{Fzg} = 160\text{km/h}$

Durch kombinierte Anregungsänderungen lässt sich kein überproportionaler Einfluss der Auftriebskräfte auf die Fahrzeugreaktion feststellen. Die maximale Querbeschleunigung und Giergeschwindigkeit zeigen eine lineare Abhängigkeit von den multi-variaten Amplitudenänderungen der Auftriebskräfte an Vorder- und Hinterachse. Auch für die Wankgeschwindigkeit kann die Abhängigkeit in Näherung als linear bezeichnet werden. Es lässt sich für die Auftriebskräfte ein Einflussfaktor von  $EF_{F_{z1},a_y} = 0.001$  und  $EF_{F_{z2},a_y} = 0.004$  auf die maximale Querbeschleunigung, von  $EF_{F_{z1},\dot{\varphi}} = -0.010$  und  $EF_{F_{z2},\dot{\varphi}} = -0.002$  auf die maximale Wankgeschwindigkeit sowie von  $EF_{F_{z1},\dot{\psi}} = 0.002$  und  $EF_{F_{z2},\dot{\psi}} = 0.008$  auf die maximale Giergeschwindigkeit berechnen.

Für den Vergleich mit den Einflussfaktoren der aerodynamischen Seitenkraft, des Wankmoments und des Giermoments aus Tabelle 5.1 sind in Tabelle 5.2 die Einflussfaktoren der Auftriebskräfte für die maximale Querbeschleunigung, Giergeschwindigkeit und den Querversatz zum Zeitpunkt  $t_q$  bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{Fzg} = 160\text{km/h}$  aufgeführt.

<b>Einflussfaktor <math>EF_{ml}</math> <math>v_{Fzg} = 160\text{km/h}</math></b>	<b>Einfluss auf <math>a_y</math></b>	<b>Einfluss auf <math>\dot{\psi}</math></b>	<b>Einfluss auf <math>p_y</math></b>
<b>aerodyn. Auftrieb vorne</b>	0.001	0.002	-0.002
<b>aerodyn. Auftrieb hinten</b>	0.004	0.008	0.010

Tabelle 5.2.: Übersicht der linearen Einflussfaktoren des aerodynamischen Auftriebs auf Kenngrößen der Fahrzeugreaktion des Fahrzeugs V3 bei  $v_{Fzg} = 160\text{km/h}$

Betrachtet man die hier dargestellten Einflussfaktoren, so lässt sich der Einfluss der kombinierten Änderung der aerodynamischen Auftriebskräfte auf das Störungsverhalten bei  $v_{Fzg} = 160\text{km/h}$  als gering bezeichnen. Da aus den Erkenntnissen des Fahrversuchs der Einfluss der Auftriebsbeiwerte auf das Seitenwindverhalten besonders im höheren Geschwindigkeitsbereich abgeleitet wird, ist in Abbildung 5.13 zudem die Abhängigkeit der Fahrzeugantwort von einer multi-variaten Änderung der Auftriebskräfte bei  $v_{Fzg} = 220\text{km/h}$  aufgeführt.

## 5. Einfluss instationärer Kenngrößen auf die Fahrzeugreaktion

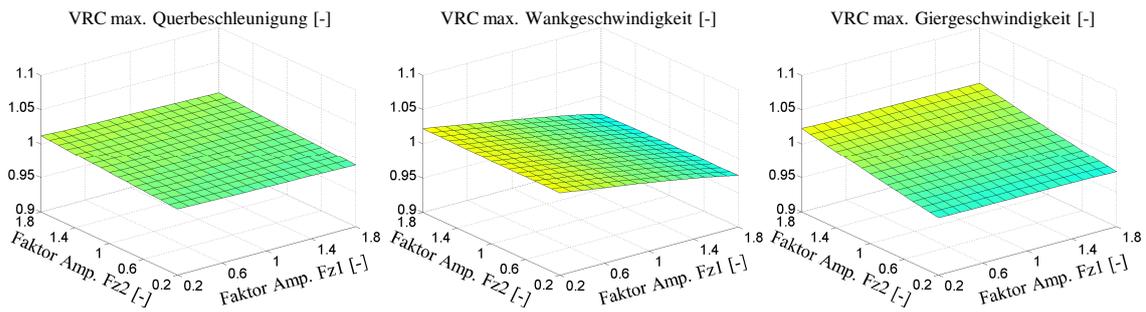


Abbildung 5.13.: Koeffizienten der Fahrzeugantwort einer kombinierten Änderung der aerodynamischen Auftriebskräfte der generischen Seitenwindböe bei  $v_{Fzg} = 220\text{km/h}$

Auch hierbei ist kein überproportionaler, nicht-linearer Einfluss der Auftriebskräfte festzustellen. Es bestätigt sich somit der geringe Einfluss der Auftriebsbeiwerte auf das Störungsverhalten der Fahrzeuge im Open-Loop-Manöver. In Tabelle 5.3 sind die Einflussfaktoren der Auftriebskräfte auf die maximale Querbeschleunigung, Giergeschwindigkeit und den Querversatz zum Zeitpunkt  $t_q$  bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{Fzg} = 220\text{km/h}$  aufgeführt.

<b>Einflussfaktor</b> $EF_{ml}$ $v_{Fzg} = 220\text{km/h}$	<b>Einfluss auf</b> $a_y$	<b>Einfluss auf</b> $\dot{\psi}$	<b>Einfluss auf</b> $p_y$
<b>aerodyn. Auftrieb vorne</b>	-0.003	-0.001	-0.009
<b>aerodyn. Auftrieb hinten</b>	0.010	0.024	0.023

Tabelle 5.3.: Übersicht der linearen Einflussfaktoren des aerodynamischen Auftriebs auf Kenngrößen der Fahrzeugreaktion des Fahrzeugs V3 bei  $v_{Fzg} = 220\text{km/h}$

Die Werte der Einflussfaktoren einer Änderung der Auftriebskräfte sind auch bei  $v_{Fzg} = 220\text{km/h}$  vergleichsweise gering. Eine Erhöhung der Auftriebsbeiwerte an der Vorderachse führt dabei zu einer geringfügigen Verringerung der Fahrzeugreaktion. Dies ist auf die Radentlastung an der Vorderachse und das daraus resultierende, tendenziell stärker untersteuernde Eigenlenkverhalten des Fahrzeugs zurückzuführen.

Die in diesem Abschnitt gezeigten Erkenntnisse zur Einflussgröße multi-variater Amplitudenänderungen auf die Fahrzeugreaktion bei Anregung durch eine generische Seitenwindböe mit Vorzeichenwechsel lassen sich auf eine generischen Seitenwindböe ohne Vorzeichenwechsel qualitativ und in Näherung quantitativ übertragen. Die hierbei identifizierten, linearen bzw. nicht-linearen Abhängigkeit lassen sich qualitativ zudem bei Anregung durch eine Seitenwindanlage feststellen.

## 5.2. Abhängigkeit von der zeitlichen Zusammensetzung

Die in der Literatur beschriebenen Anregungsverläufe einer instationären, aerodynamischen Anregung von Personenkraftwagen zeigen im Vergleich zu quasi-stationären Seitenwindböen, neben den untersuchten Amplitudenänderungen, Zeitverzüge zwischen den Peakwerten der einzelnen aerodynamischen Kräfte und Momente. Die auftretenden Zeitverzüge werden vor allem bei Betrachtung aerodynamischer Seitenwindböen durchschnittlicher Anregungsgröße deutlich. Auch bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage zeigen sich im Bereich der Ein- und Ausfahrt instationäre Einflüsse, die den zeitlichen Aufbau der aerodynamischen Anregungsgrößen bestimmen. Die Auswirkungen dieser zeitlichen Unterschiede des Verlaufs der Anregungsgrößen von einer quasi-stationären Betrachtung auf die Fahrzeugreaktion sind jedoch, wie in Abschnitt 4.4 beschrieben, im Vergleich zum Einfluss der Gesamtanregung der Seitenwindanlage gering.

Im Folgenden wird der Einfluss der zeitlichen Zusammensetzung der generischen Seitenwindböe einer durchschnittlichen Anregungsamplitude genauer untersucht. Dazu werden Zeitverzüge zwischen den einzelnen Anregungssignalen der generischen, quasi-stationären Seitenwindböe QSG vorgegeben. Abbildung 5.14 zeigt eine Darstellung der Vorgabe von Zeitverzügen zwischen einzelnen aerodynamischen Anregungsgrößen der quasi-stationären Seitenwindböe.

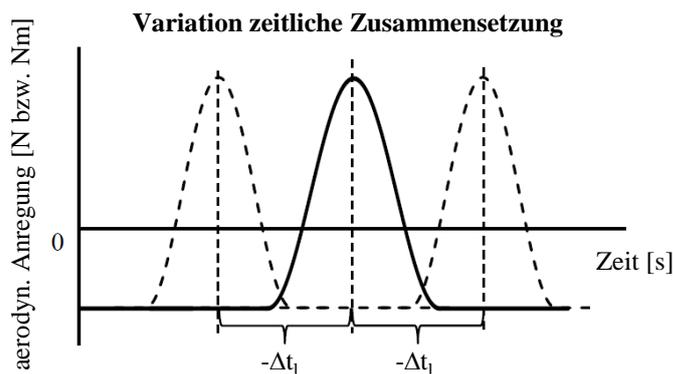


Abbildung 5.14.: Darstellung der Variation der Zeitverzüge der quasi-stationären Seitenwindböe

Da die in der Literatur aufgeführten Zeitverzüge instationärer Anregungsgrößen zumeist anhand einzelnen, spezifischen Anregungsverläufen beispielhaft bestimmt wurden, wird im Folgenden ein Bereich möglicher Zeitverzüge untersucht. Als Wertebereich werden dazu generisch Zeitverzüge zwischen  $\Delta t_l = +500ms$   $\Delta t_l = -500ms$  vorgegeben.

Im Rahmen der Untersuchung des Einflusses einer Amplitudenänderung in Abschnitt 5.1 wurden die aerodynamische Seitenkraft, das Wankmoment und Giermoment als relevante Größen für die Fahrzeugreaktion bei Betrachtung des Störungsverhaltens identifiziert. Im Folgenden werden die Einflüsse der zeitlichen Zusammensetzung der für die Fahrzeugreaktion als besonders relevant bewerteten Anregungsgrößen dargestellt. Dazu wird durch Verschiebung des Zeitpunkts der auftretenden Maximalwerte der Anregungsgrößen der quasi-stationären Seitenwindböe nach Gleichung 3.2 eine Änderung der Zeitverzüge realisiert. Auch hierbei ist kein überproportionaler, nicht-linearer Einfluss der Auftriebskräfte festzustellen. Der aus dem Fahrversuch bekannte Effekt der Auftriebsbeiwerte ist daher auf den Einfluss auf das Führungsverhalten des Personenkraftwagens zurückzuführen.

## 5. Einfluss instationärer Kenngrößen auf die Fahrzeugreaktion

Durch die Variation der Peakwerte des maximalen Wankmoments sowie maximalen Giermoments werden somit die Zeitverzögerungen  $\Delta t_{M_x \text{ zu } F_y}$  sowie  $\Delta t_{M_y \text{ zu } F_y}$  vorgegeben. Der Zeitpunkt des Peakwertes der maximalen Seitenkraft bleibt in den einzelnen Simulationen unverändert.

### 5.2.1. Einfluss von Zeitverzögerungen der Anregungsgrößen

Zunächst wird der Einfluss der zeitlichen Zusammensetzung der Anregungsgrößen auf einzelne Kenngrößen der Fahrzeugreaktion anhand von Simulationsergebnissen des Fahrzeugmodells V3 detaillierter betrachtet. Der Einfluss der Zeitverzögerungen  $\Delta t_{M_x \text{ zu } F_y}$  sowie  $\Delta t_{M_y \text{ zu } F_y}$  auf ausgewählte Kenngrößen der Fahrzeugreaktion wird über die Ansicht eines Oberflächendiagramms dargestellt. Abbildung 5.15 zeigt die Simulationsergebnisse der VRCs der maximalen Querbeschleunigung bei Änderung der zeitlichen Zusammensetzung der Peakwerte der aerodynamischen Seitenkraft, des aerodynamischen Giermoments und Wankmoments der generischen Seitenwindböe bei einer konstanten Fahrzeuggeschwindigkeit von 140km/h. Die generische, quasi-stationäre Seitenwindböe weist bei den folgenden Untersuchungsergebnissen einen Vorzeichenwechsel des Anströmwinkels auf.

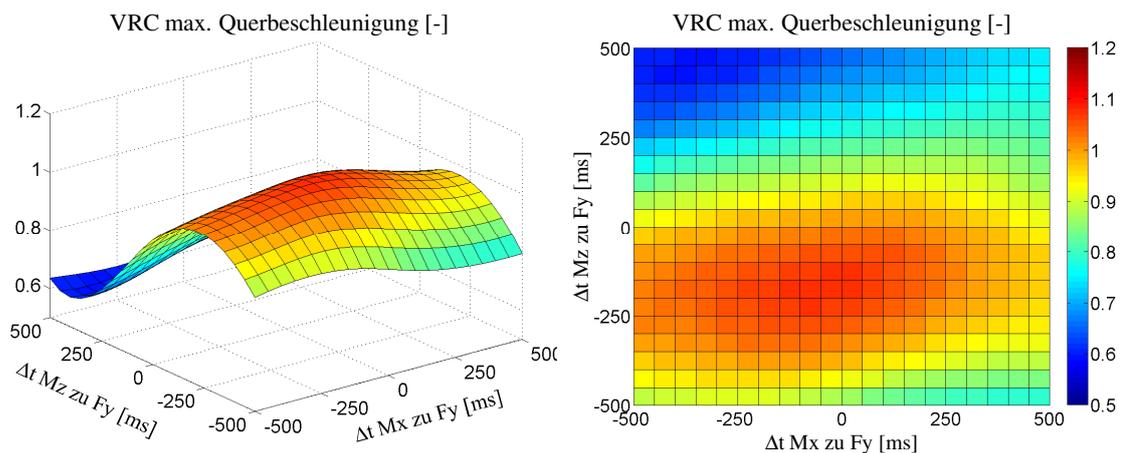


Abbildung 5.15.: Einfluss der Zeitverzögerungen zwischen aerodynamischer Seitenkraft, Giermoment und Wankmoment der QSG mit Vorzeichenwechsel auf  $\max(a_y)$  bei  $v_{Fzg}=140\text{km/h}$

Betrachtet man die maximal auftretende Querbeschleunigung, so kann der Einfluss von Zeitverzögerungen der Anregung wie folgt beschrieben werden. Der Koeffizient der Fahrzeugantwort korreliert nicht-linear mit einer Änderung der zeitlichen Zusammensetzung der aerodynamischen Anregungsgrößen. Durch einen negativen Zeitverzug der Maximalwerte des aerodynamischen Giermoments und der Seitenkraft steigt die maximale Querbeschleunigung. Ein positiver Zeitverzug führt zu einer niedrigeren maximalen Querbeschleunigung des Fahrzeuges. Bei einem negativen Zeitverzug zwischen dem maximalem aerodynamischen Wankmoment und der aerodynamischen Seitenkraft kann zudem ein Anstieg der maximalen Querbeschleunigung identifiziert werden. Die zeitliche Zusammensetzung der generischen Seitenwindböe mit einem Zeitverzug von zirka -200ms zwischen  $M_z$  und  $F_y$  und einem Zeitverzug von -50ms zwischen  $M_x$  und  $F_y$  führt zu einem globalem Maximum der VRCs von  $\max(VRC_{\max(a_y)}) = 1.075$ .

Vergleicht man das hierbei ermittelte globale Maximum der VRCs in Abhängigkeit der zeitlichen Zusammensetzung mit dem VRC einer 10% Amplitudenänderung des Giermomentes von  $VRC_{max(ay)} = 1.054$  der generischen Seitenwindböe, so wird die Einflussgröße des zeitlichen Aufbaus einer transienten aerodynamischen Anregung auf die Fahrzeugantwort und somit auf das Störungsverhalten von Personenkraftwagen deutlich. Bei einer zeitlichen Zusammensetzung von etwa +400ms zwischen  $M_z$  und  $F_y$  und -400ms zwischen  $M_z$  und  $F_y$  zeigt sich ein globales Minimum der VRC von  $min(VRC_{max(ay)}) = 0.58$ . Zur Erläuterung der hierbei aufgezeigten Zusammenhänge wird in Abbildung 5.16 zunächst der Zeitverlauf des Wankwinkels bei einer schrittweisen Variation des Zeitverzugs des Giermomentes (a) und des Wankmoments (b) um +500/-500ms einzelnen aufgetragen.

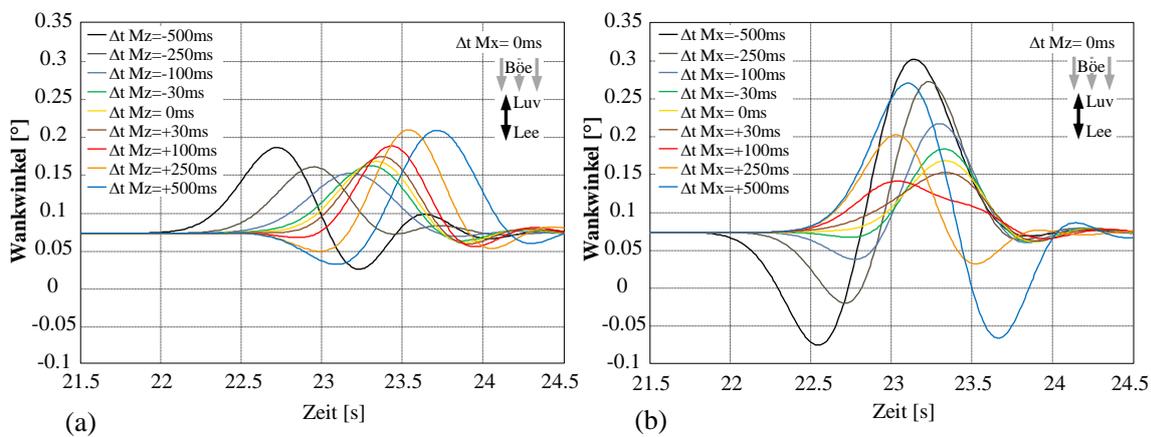


Abbildung 5.16.: Verlauf des Wankwinkels als Reaktion auf die generische Seitenwindböe mit einer Variation des Zeitverzugs des Giermoments (a) und des Wankmoments (b) um +500/-500ms bei  $v_{Fzg} = 140\text{km/h}$

Der hier aufgezeigte Verlauf des Wankwinkels soll zunächst nur die Wankrichtung des betrachteten Fahrzeugs bei auftretender Seitenwindböe verdeutlichen. In Abbildung 5.17 sind die Zeitverläufe der Querbeschleunigung bei einer schrittweisen Variation des Zeitverzugs des Giermoments (a) und des Wankmoments (b) um +500/-500ms einzelnen aufgetragen.

Betrachtet man die hier aufgezeigten Verläufe, so lassen sich die Zusammenhänge in Darstellung 5.15 erläutern. Durch eine Erhöhung des Zeitverzugs zwischen Giermoment und Seitenkraft in Abbildung 5.17 (a) wird der Einfluss der Anregungsgrößen auf die Trajektorie der Fahrzeugantwort zeitlich entzerrt. Der Radius der resultierenden Bahnkurve wird größer, so dass eine Verringerung der maximalen Querbeschleunigung festzustellen ist. Durch eine Erhöhung des Zeitverzugs zwischen Wankmoment und Seitenkraft in Abbildung 5.17 (b) ist eine deutliche Wankbewegung in Lee-Richtung festzustellen. Aufgrund der zeitlichen Aufeinanderfolge des aerodynamischen Wankmoments und des Wankens aufgrund der Zentrifugalbeschleunigung ist eine Wankbewegung in Luv- und in Lee-Richtung entsprechend des Vorzeichens des Zeitverzugs festzustellen. Durch die Wankbewegung in Gegenrichtung des Vektors der Zentripetalbeschleunigung wird die maximale Querbeschleunigung des Fahrzeugaufbaus verringert. Der kombinierte Einfluss der Zeitverzüge der Anregungsgrößen auf die maximale Giergeschwindigkeit ist in Abbildung 5.18 dargestellt.

## 5. Einfluss instationärer Kenngrößen auf die Fahrzeugreaktion

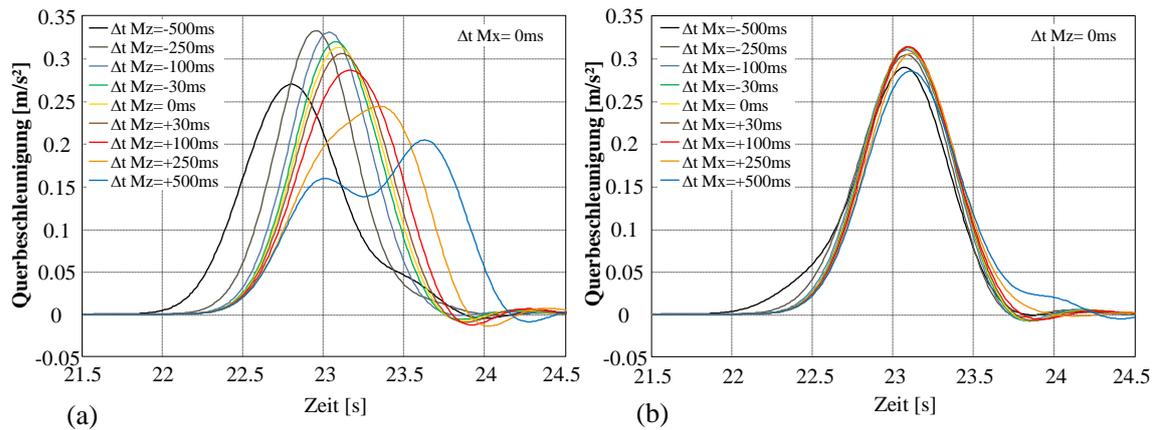


Abbildung 5.17.: Verlauf der Querbeschleunigung als Reaktion auf die generische Seitenwindböe mit einer Variation des Zeitverzugs des Giermoments (a) und des Wankmoments (b) um +500/-500ms bei  $v_{Fzg} = 140\text{km/h}$

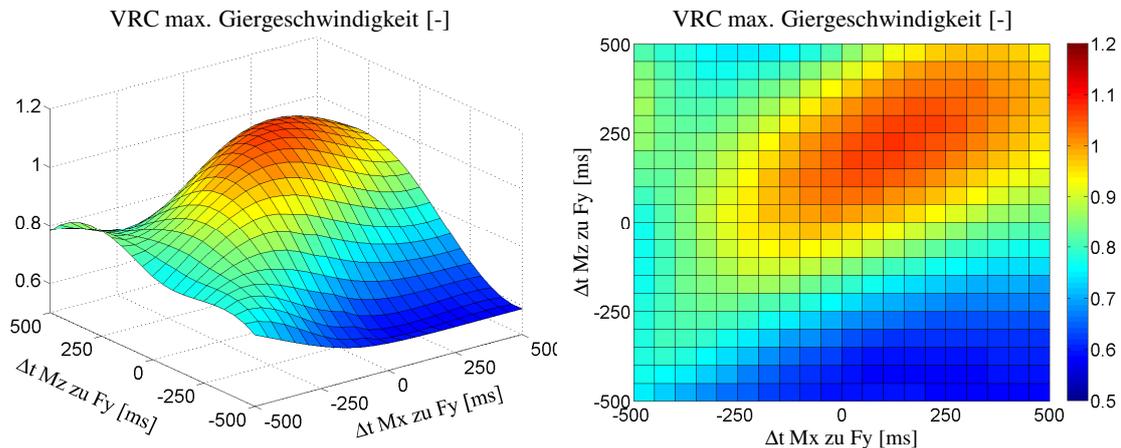


Abbildung 5.18.: Einfluss der Zeitverzögerungen zwischen aerodynamischer Seitenkraft, Giermoment und Wankmoment der QSG mit Vorzeichenwechsel auf  $\max(\psi)$  bei  $v_{Fzg} = 140\text{km/h}$

Die VRCs der maximalen Giergeschwindigkeit zeigen auch eine nicht-lineare Abhängigkeit gegenüber Änderungen der Zeitverzögerungen. Dabei variiert der VRC der maximalen Giergeschwindigkeit in Näherung in einer vergleichbaren Größenordnung zwischen  $\max(VRC_{\max(\psi)}) = 1.075$  und  $\min(VRC_{\max(\psi)}) = 0.58$ . Das globale Maximum der VRCs für die maximale Giergeschwindigkeit zeigt sich bei einem Zeitverzug von +200ms zwischen Mz und Fy und einem Zeitverzug von +100ms zwischen Mx und Fy. Abbildung 5.19 zeigt die einzelnen Zeitverläufe der Giergeschwindigkeit bei einer schrittweisen Variation des Zeitverzugs des Giermoments (a) und des Wankmoments (b) um +500/-500ms.

In der Abbildung wird wiederum der Einfluss einer zeitlichen Entzerrung der aerodynamischen Seitenkraft und des Giermoments auf die Fahrzeugtrajektorie und somit auf die Giergeschwindigkeit sichtbar. Bei steigendem Betrag des Zeitverzugs sinkt die maximale Gierge-

## 5.2. Abhängigkeit von der zeitlichen Zusammensetzung

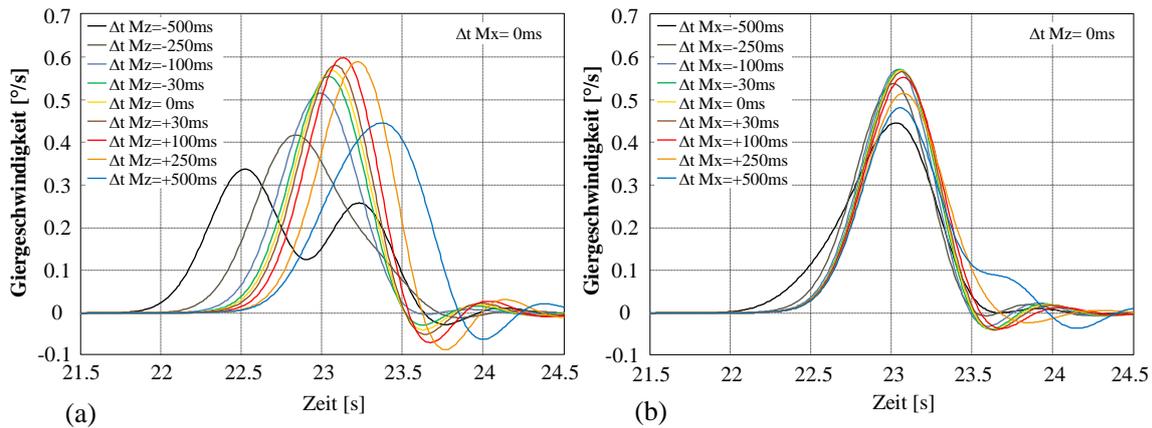


Abbildung 5.19.: Verlauf der Giergeschwindigkeit als Reaktion auf die generische Seitenwindböe mit einer Variation des Zeitverzugs des Giermoments (a) und des Wankmoments (b) um +500/-500ms bei  $v_{Fzg} = 140\text{km/h}$

schwindigkeit und es sind zum Teil zwei Maxima festzustellen. Die beiden Maxima sind auf die aerodynamische Seitenkraft und das aerodynamische Giermoment zurückzuführen. Auch eine Erhöhung des Betrags der Zeitverzögerungen zwischen aerodynamischer Seitenkraft und des Wankmoments hat aufgrund des Einflusses auf die Wankrichtung eine Verringerung der Gierreaktion zur Folge. Abbildung 5.20 zeigt die VRCs für die maximale Wankgeschwindigkeit über die Variation der Zeitverzögerungen der aerodynamischen Größen.

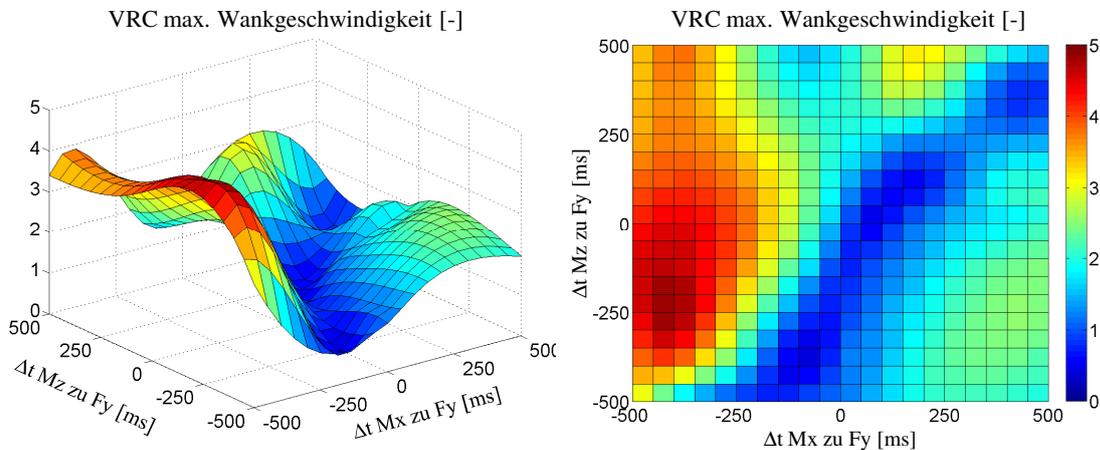


Abbildung 5.20.: Einfluss der Zeitverzögerungen zwischen aerodynamischer Seitenkraft, Giermoment und Wankmoment der QSG mit Vorzeichenwechsel auf  $\max(\dot{\varphi})$  bei  $v_{Fzg} = 140\text{km/h}$

Die maximale Wankgeschwindigkeit zeigt eine deutlich komplexere Abhängigkeit von der zeitlichen Zusammensetzung der generischen aerodynamischen Böe. Ein globales Minimum von  $\min(VRC_{\max(\dot{\varphi})}) = 0.45$  zeigt sich bei einem Zeitverzug von -350ms zwischen den Maximalwerten von  $M_z$  und  $F_y$  und einem Zeitverzug von -100ms zwischen  $M_x$  und  $F_y$ . Ein Zeitverzug von -450ms zwischen  $M_x$  und  $F_y$  führt zu einem in dem betrachteten Wertebereich globalen

## 5. Einfluss instationärer Kenngrößen auf die Fahrzeugreaktion

Maximum des Koeffizienten der Fahrzeugreaktion von  $\max(VRC_{\max(\dot{\varphi})}) = 4.8$ . Darüberhinaus zeigen sich in dem Wertebereich diverse lokale Minima und Maxima. Abbildung 5.21 zeigt den Zusammenhang der minimalen Wankgeschwindigkeit vom zeitlichen Aufbau der Anregung.

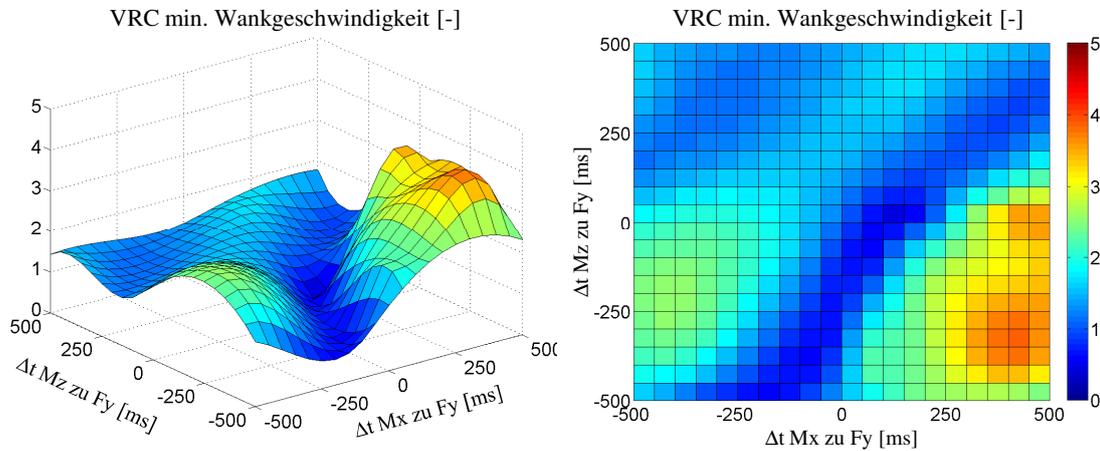


Abbildung 5.21.: Einfluss der Zeitverzögerungen zwischen aerodynamischer Seitenkraft, Giermoment und Wankmoment der QSG mit Vorzeichenwechsel auf  $\min(\dot{\varphi})$  bei  $v_{Fzg} = 140 \text{ km/h}$

Auch die minimale Wankgeschwindigkeit zeigt eine komplexe Abhängigkeit gegenüber der Ausprägung der Zeitverzögerungen der Anregung. Im untersuchten Wertebereich sind auch hier lokale Minima und Maxima zu identifizieren. Das globale Minimum des Wertebereichs kann bei einem Zeitverzug von  $+100 \text{ ms}$  zwischen  $M_x$  und  $F_y$  und von  $0 \text{ ms}$  zwischen  $M_z$  und  $F_y$  festgestellt werden. Das globale Maximum zeigt sich bei einem Zeitverzug von  $+400 \text{ ms}$  zwischen  $M_x$  und  $F_y$  und  $-350 \text{ ms}$  zwischen  $M_z$  und  $F_y$ . Zur Erläuterung der Zusammenhänge ist ergänzend zur Darstellung des Wankwinkels in Abbildung 5.16 der Verlauf der Wankgeschwindigkeit in Abbildung 5.22 dargestellt.

Durch höhere Zeitverzögerungen zwischen aerodynamischem Giermoment und aerodynamischer Seitenkraft sowie aerodynamischen Wankmoment in Abbildung (a) ist teilweise ein Wanken in Lee-Richtung festzustellen. Dies liegt in der zeitlichen Entzerrung des Maximums des aerodynamischen Wankmoments und der Inertialbeschleunigung begründet. Durch eine Verringerung des Zeitverzugs ist eine deutliche Erhöhung des Wankens in Lee-Richtung und somit eine Erhöhung der maximalen Wankgeschwindigkeit durch das Zurückwanken in den nivellierten Zustand festzustellen. Durch Erhöhung des Zeitverzuges des aerodynamischen Wankmoments ist ein höherer Betrag der maximalen negativen Wankgeschwindigkeit festzustellen. Das Wanken in Lee-Richtung ist hierbei durch das weitgehend einzeln auftretenden aerodynamische Wankmoment begründet. In Abbildung 5.23 wird die Abhängigkeit der maximalen Querbeschleunigung des Fahrzeuges von der zeitlichen Zusammensetzung der generischen Seitenwindböe bei einer Fahrzeuggeschwindigkeit von  $v_{Fzg} = 200 \text{ km/h}$  aufgezeigt.

Stellt man den Einfluss der zeitlichen Zusammensetzung bei  $v_{Fzg} = 200 \text{ km/h}$  in Abbildung 5.23 den Einfluss bei  $v_{Fzg} = 140 \text{ km/h}$  in Abbildung 5.15 gegenüber, so können die Zusammenhänge in Näherung als identisch bezeichnet werden. Der relative Einfluss der zeitlichen Zu-

## 5.2. Abhängigkeit von der zeitlichen Zusammensetzung

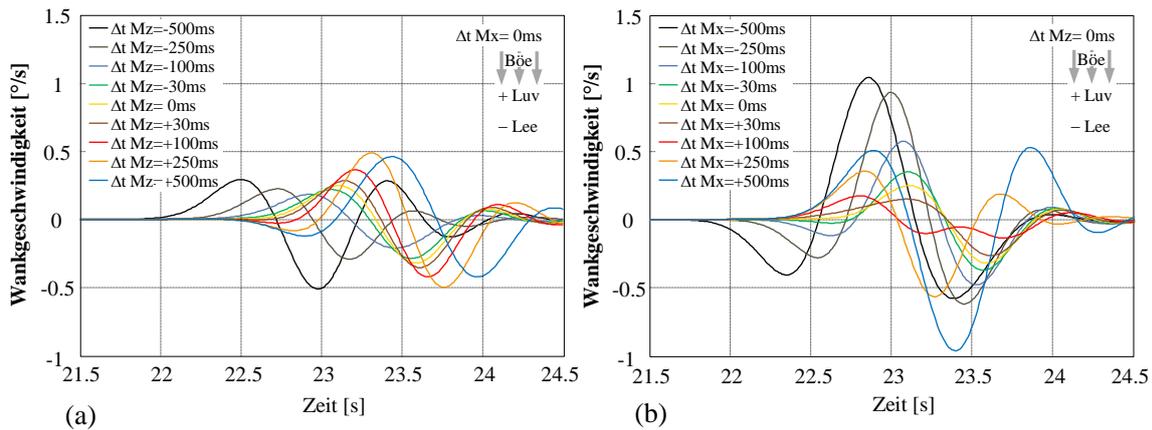


Abbildung 5.22.: Verlauf der Wankgeschwindigkeit als Reaktion auf die generische Seitenwindböe mit einer Variation des Zeitverzugs des Giermoments (a) und des Wankmoments (b) um +500/-500ms bei  $v_{Fzg} = 140\text{km/h}$

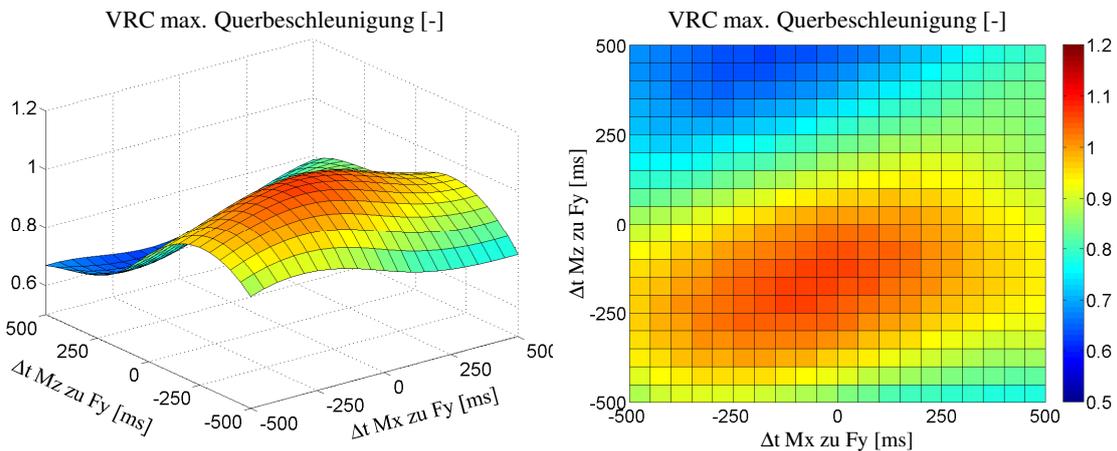


Abbildung 5.23.: Einfluss der Zeitverzögerungen zwischen aerodynamischer Seitenkraft, Giermoment und Wankmoment der QSG mit Vorzeichenwechsel auf  $\max(a_y)$  bei  $v_{Fzg} = 200\text{km/h}$

sammensetzung kann somit als unabhängig von der Fahrzeuggeschwindigkeit betrachtet werden.

Zusammengefasst konnte die zeitliche Zusammensetzung der aerodynamischen Anregung als signifikanter Parameter für das Antwortverhalten von Personenkraftwagen identifiziert werden. Um die Reaktion von Personenkraftwagen bei instationärer, aerodynamischer Anregung zu verbessern, gilt es somit, die zeitliche Zusammensetzung aerodynamischer Kräfte und Momente am Fahrzeug zu betrachten und, falls möglich, durch die Gestaltung der Außenform des Fahrzeugs positiv zu beeinflussen. Ein höherer Zeitverzug zwischen maximalem aerodynamischen Giermoment und maximaler aerodynamischer Seitenkraft sowie maximalem aerodynamischen Wankmoment und maximaler aerodynamischer Seitenkraft führt zu einer Verringerung der Querbeschleunigung und der Giergeschwindigkeit der Seitenwindreaktion. Dem steht eine Erhöhung

Betrags der maximalen bzw. der minimalen Wankgeschwindigkeit gegenüber. Je nach Einflussgröße der Aufbaugrößen auf die subjektive Wahrnehmung ist eine Erhöhung oder Verringerung der Zeitverzüge anzustreben. Untersucht man die Einflussgröße von Zeitverzügen der aerodynamischen Anregungsgrößen auf die Fahrzeugreaktion bei einer Seitenwindböe ohne einen Vorzeichenwechsel im Verlauf des Anströmwinkels, so zeigen sich vergleichbare Zusammenhänge.

### 5.2.2. Fahrzeugabhängigkeit des Einflusses von Zeitverzügen

Um den Einfluss der zeitlichen Zusammensetzung der aerodynamischen Anregung auf unterschiedliche Fahrzeug- bzw. Achsarchitekturen zu untersuchen, wird im Folgenden als Beispiel der Einfluss von Zeitverzügen auf die Fahrzeuge der oberen Mittelklasse V3 und V4 mit unterschiedlichen Fahrwerksarchitekturen und Fahrzeugparametern aus Tabelle 4.1 dargestellt. Die Amplituden der einzelnen Anregungsgrößen der generischen Seitenwindböe sind im Rahmen des folgenden Vergleichs für die untersuchten Fahrzeuge identisch. Dadurch wären etwaige, identifizierte Unterschiede rein auf die Ausprägung der Fahrzeug- bzw. Fahrwerksarchitektur und nicht auf die Amplituden der aerodynamischen Anregung zurückzuführen. Die Simulationen wurden hierbei bei einer konstanten Fahrzeuggeschwindigkeit von 160 km/h durchgeführt. Abbildung 5.24 zeigt den Vergleich der VRCs bei einer Änderung der zeitlichen Zusammensetzung der generischen Böe mit Vorzeichenwechsel für (a) Fahrzeug V3 und (b) Fahrzeug V4.

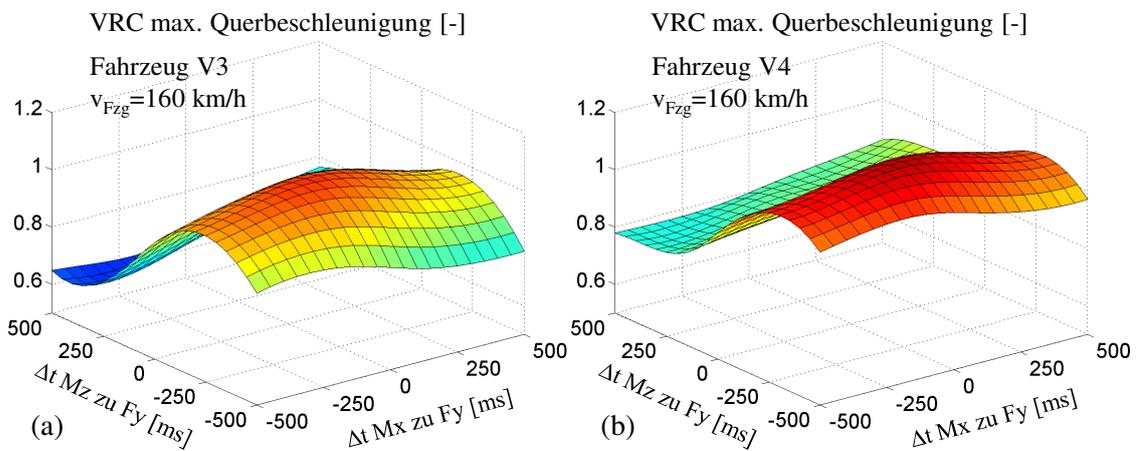


Abbildung 5.24.: Einfluss der zeitlichen Zusammensetzung der aerodynamischen Anregung auf  $\max(a_y)$  für (a) Fahrzeug V3 und (b) Fahrzeug V4 bei  $v_{Fzg} = 160\text{km/h}$

Generell zeigen die Abbildungen 5.24 (a) und (b) eine Erhöhung der maximalen Querbeschleunigung bei Verringerung des Zeitverzuges zwischen Fy und Mz. Das globale Maximum beträgt  $\max(VRC_{\max(a_y)}) = 1.075$  für das Fahrzeug V3 und  $\max(VRC_{\max(a_y)}) = 1.150$  für das Fahrzeug V4. Die Maxima befinden sich dabei bei ähnlichen zeitlichen Zusammensetzungen. Der Einfluss des Zeitverzugs zwischen Mx und Fy stellt sich wiederum vergleichsweise gering dar. Der Einfluss einer Änderung der Zeitverzüge ist für die Fahrzeuge V3 und V4 qualitativ in Näherung ähnlich. Auch bei Fahrzeug V4 lässt sich bei Erhöhung des Zeitverzugs zwischen Mz und Fy eine Verringerung der maximalen Querbeschleunigung feststellen. Jedoch

ist die Größenordnung des Einflusses deutlich unterschiedlich. Diese Unterschiede werden bei Betrachtung einzelner Werte deutlich. Fahrzeug V3 zeigt bei einem Zeitverzug zwischen  $M_z$  und  $F_y$  von +500ms und einem Zeitverzug zwischen  $M_x$  und  $F_y$  von -500ms einen Faktor von 0.64, wohingegen Fahrzeug V4 einen Faktor von 0.77 aufweist. Eine generelle Aussage der Einflussgröße von Zeitverzügen und der Übertragbarkeit auf andere Fahrzeugarchitekturen ist somit nicht möglich. In Abbildung 5.25 ist der Einfluss der zeitlichen Zusammensetzung auf die Fahrzeuge die maximale Giergeschwindigkeit für V3 und V4 gegenübergestellt.

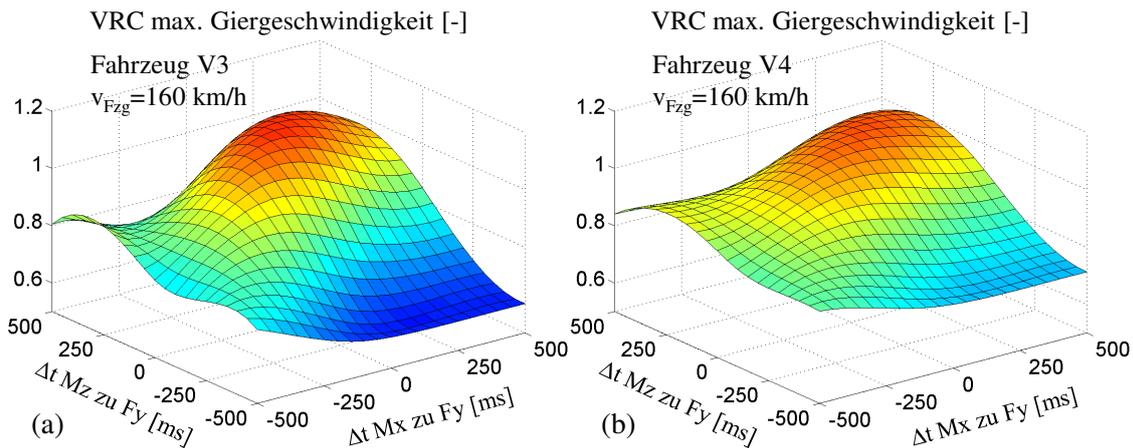


Abbildung 5.25.: Einfluss der zeitlichen Zusammensetzung der aerodynamischen Anregung auf die  $\max(\dot{\psi})$  für (a) Fahrzeug V3, (b) Fahrzeug V4 bei  $v_{Fzg} = 160 \text{ km/h}$

Der Einfluss der zeitlichen Zusammensetzung zeigt für die maximale Giergeschwindigkeit erneut einen qualitativ ähnlichen Verlauf. Auch hier sind jedoch die Amplituden der Einflussgröße unterschiedlich und somit die Einflussgröße von Zeitverzügen fahrzeugübergreifend nicht allgemeingültig formulierbar. Der Einfluss der zeitlichen Zusammensetzung auf die maximale Wankgeschwindigkeit für V3 und V4 ist in Abbildung 5.26 aufgetragen.

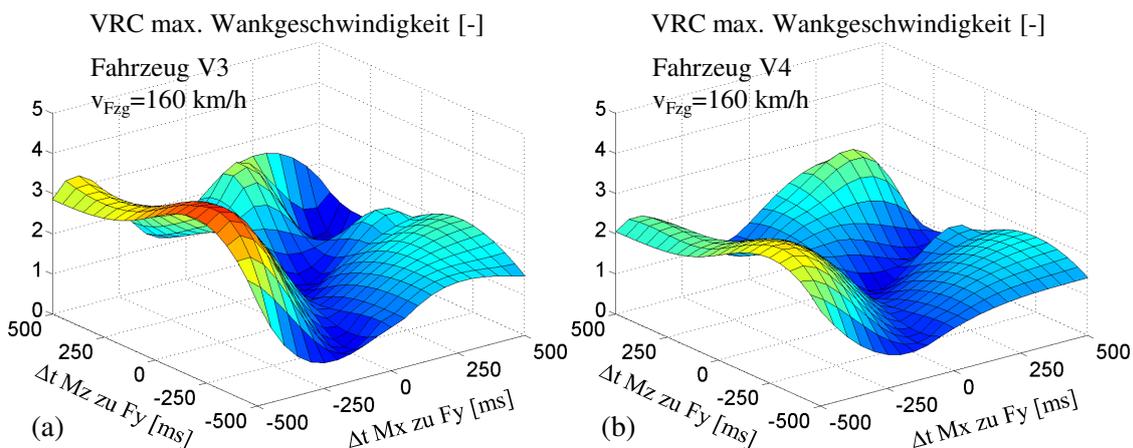


Abbildung 5.26.: Einflüsse der zeitlichen Zusammensetzung der aerodynamischen Anregung auf die  $\max(\dot{\varphi})$  für (a) Fahrzeug V3 und (b) Fahrzeug V4 bei  $v_{Fzg} = 160 \text{ km/h}$

## 5. Einfluss instationärer Kenngrößen auf die Fahrzeugreaktion

Die Abhängigkeit der Giergeschwindigkeit von der zeitlichen Zusammensetzung der Anregungsgrößen stellt sich bei den Fahrzeugen ähnlich dar. Das globale Maximum des Fahrzeugs V4 ist dabei deutlich geringer. Der generell geringere Einfluss des Zeitverzugs zwischen Wankmoment und Seitenkraft sowie das geringere Maximum der Wankgeschwindigkeit lässt auf ein vergleichsweise geringes aerodynamisches Wankmoment des Fahrzeugs V4 schließen. Darüberhinaus ist in Abbildung 5.27 der Einfluss der zeitlichen Zusammensetzung auf die minimale Wankgeschwindigkeit für V3 und V4 aufgetragen.

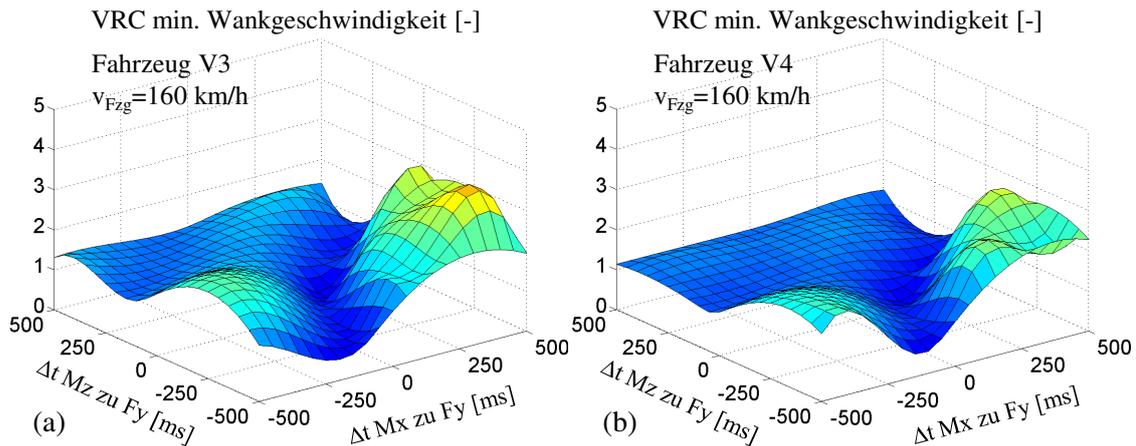


Abbildung 5.27.: Einfluss der zeitlichen Zusammensetzung der aerodynamischen Anregung auf die minimale Wankgeschwindigkeit für (a) Fahrzeug V3, (b) Fahrzeug V4 und bei  $v_{Fzg} = 160 \text{ km/h}$

Wiederum ist ein geringerer Peakwert des globales Minimums der Wankgeschwindigkeit des Fahrzeugs V4 festzustellen. Vergleicht man die Einflussgröße der zeitlichen Zusammensetzung der aerodynamischen Kenngrößen auf zwei unterschiedliche Fahrwerksarchitekturen, so sind die aufgezeigten Abhängigkeiten qualitativ ähnlich. Aufgrund der Unterschiede in der Einflussgröße lässt sich eine allgemeingültige, fahrzeugunabhängige Aussage jedoch nicht ableiten. Die am Beispiel der Fahrzeuge V3 und V4 aufgezeigten Ergebnisse lassen sich auf weitere Fahrzeug- und Achsarchitekturen übertragen. Im Folgenden wird der kombinierte Einfluss von Amplitudenänderungen und Zeitverzügen auf die Fahrzeugreaktion betrachtet. Dies wird an einem Beispiel charakteristischer Werte instationärer Anregung aufgezeigt.

### 5.3. Einfluss einer kombinierten Anregungsänderungen

Der kombinierte Wirkmechanismus instationärer aerodynamischer Anregungen auf die Fahrzeugreaktion wird anhand einer inkrementalen Einflussanalyse repräsentativer Werte einer instationären Seitenwindböe untersucht. Dazu wird die generische, quasi-stationäre aerodynamische Böe QSG entsprechend instationären Kenngrößen derart variiert, dass der Verlauf der Anregungsgrößen einer instationären aerodynamischen Böe USG entspricht. In Tabelle 5.4 sind charakteristische Verstärkungsfaktoren der Amplituden sowie auftretende Zeitverzüge der Kräfte und Momente einer instationären aerodynamischen Anregung nach [160] aufgeführt. Die hier aufgeführten Parameter wurden aus CFD-Simulationen ermittelt.

<b>Instationäre Charakteristika</b>	<b>Verstärkungsfaktor <math>\lambda_l</math> USG zu QSG [-]</b>	<b>Zeitverzug <math>\Delta t_l</math> USG zu QSG [ms]</b>
<b>aerodyn. Seitenkraft</b>	0.55	+40
<b>aerodyn. Wankmoment</b>	0.44	+110
<b>aerodyn. Giermoment</b>	2.07	-80

Tabelle 5.4.: Übersicht der in der Literatur aufgezeigten Verstärkungsfaktoren und Zeitverzüge instationärer Seitenwindböen nach [160]

Die hier aufgeführten Werte werden im Folgenden als Vorgabewerte für die instationären Charakteristika des Fahrzeugs der oberen Mittelklasse V3 angenommen. Die Fahrzeugreaktion wird über die MKS-Modellierung des Fahrzeugs berechnet. In folgender Abbildung 5.28 ist die Ableitung einer generischen, instationären Seitenwindböe (USG) aus der beschriebenen generischen, quasi-stationären Seitenwindböe (QSG) dargestellt. Hierbei ist der Verlauf der Seitenkraft (a), des Wankmoments (b) und des Giermomentes (c) einer quasi-stationären Böe QSG sowie der Verlauf der Kenngrößen der entsprechenden instationären Böe USG aufgetragen. Die aufgezeigten Anregungsgrößen resultieren aus einer Seitenwindböe mit einem Vorzeichenwechsel im Verlauf des Anströmwinkels, somit einer aerodynamischen Anregung mit einer konstanten Seitenwindanströmung vor Auftreffen der Seitenwindböe. Dies wird durch die konstanten aerodynamischen Anregungsgrößen bei Geradeausfahrt deutlich.

Im Folgenden wird auf das Ergebnis der schrittweisen Einflussanalyse eingegangen. Abbildung 5.29 zeigt die VRCs der Fahrzeugantwort bei einer quasi-stationären transienten Seitenwindböe und zudem die VRCs der Fahrzeugantwort bei einer generischen Böe mit singulären und kombinierten Änderungen entsprechend instationärer Teilcharakteristika.

Zunächst wird der Einfluss der Amplitudenänderung erläutert. Eine 45 % geringere Amplitude der aerodynamischen Seitenkraft führt zu einer Verringerung der maximalen Querschleunigung der Fahrzeugreaktion und der maximalen Giergeschwindigkeit um zirka 5 %. Die Amplituden der maximalen Wankgeschwindigkeit sind in Näherung um 18 % erhöht. Die Werte der minimalen Querschleunigung und minimalen Giergeschwindigkeit sind um zirka 16 % und der minimalen Wankgeschwindigkeit um 8 % erhöht. Wird die Amplitude des Wankmoments um 56 % verringert, zeigt sich zum Teil eine Verringerung der Fahrzeugantwort. Die maximale Querschleunigung und Giergeschwindigkeit verringert sich um 5-7 %, wobei die maximale und minimale Wankgeschwindigkeit nur geringfügig um 2-7 % zunimmt. Durch eine Erhöhung des aerodynamischen Giermoments um 107 % zeigt sich eine deutliche Erhöhung der Fahrzeugantwort bezüglich der maximalen Querschleunigung und maximalen Giergeschwindigkeit um zirka 80 % sowie der maximalen Wankgeschwindigkeit um zirka 120 % im Vergleich zur quasi-stationären Anregung.

Bei einer kombinierten Amplitudenänderung der Anregungsgrößen Seitenkraft, Wankmoment und Giermoment entsprechend der Parameter nach Tabelle 5.4 zeigt sich eine Erhöhung der maximalen Querschleunigung und Giergeschwindigkeit um zirka 70 %, der maximalen und minimalen Wankgeschwindigkeit um etwa 125 % sowie der minimalen Querschleunigung

## 5. Einfluss instationärer Kenngrößen auf die Fahrzeugreaktion

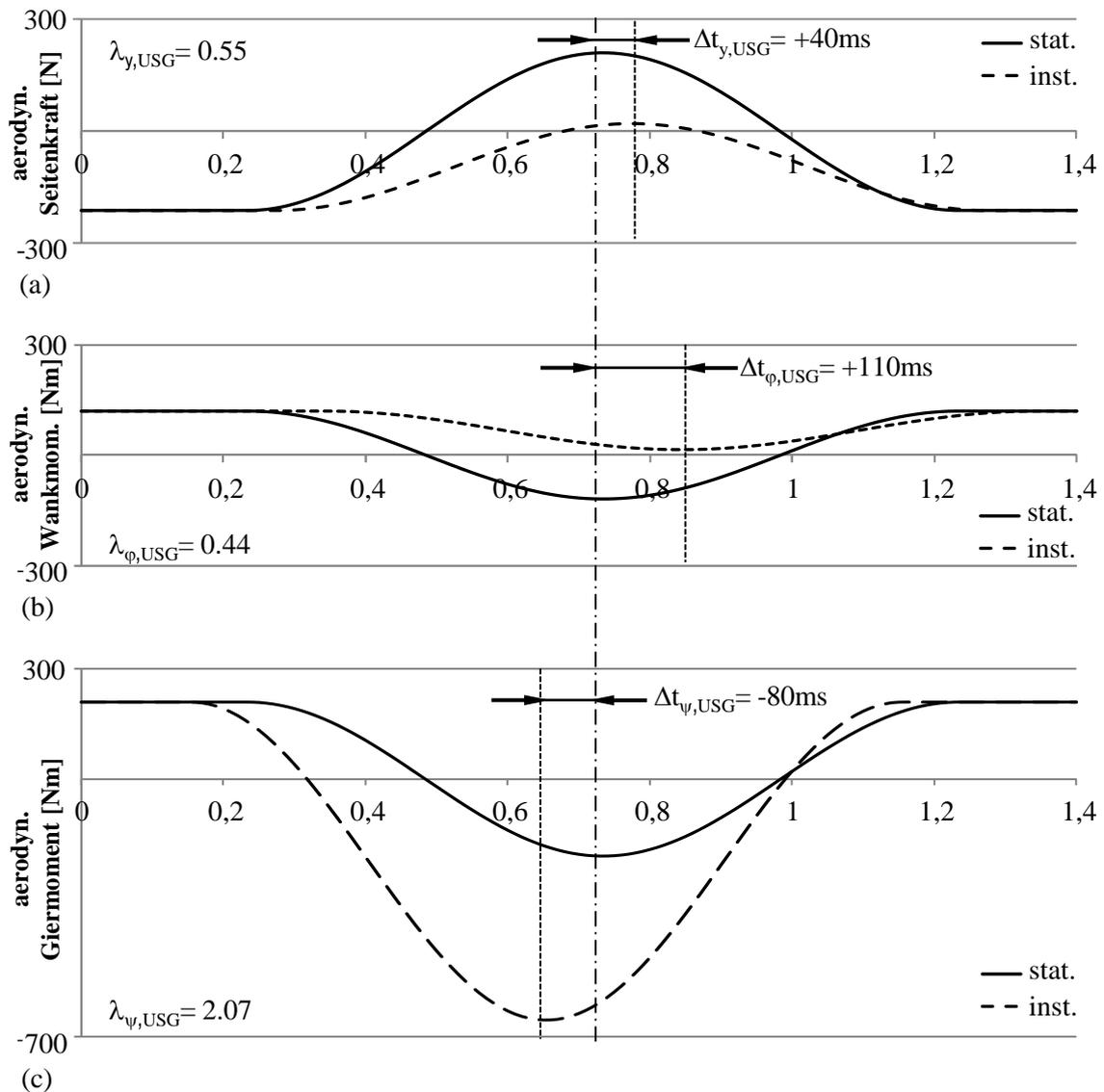


Abbildung 5.28.: Darstellung der instationären Verläufe abgeleitet aus quasi-stationären Anregungskenngrößen für Seitenkraft (a), Wankmoment (b) und Gierrmoment (c)

und Giergeschwindigkeit um etwa 130 %. Die Änderung der Amplitude des aerodynamischen Gierrmoments als charakteristische Größe der instationärer aerodynamischer Anregung hat somit den maßgeblichen Einfluss auf die Fahrzeugantwort. Summiert man die Einflussgröße der einzelnen Amplitudenänderungen auf die Kenngrößen der Fahrzeugantwort, so kann die lineare Abhängigkeit der maximalen Querschleunigung, Giergeschwindigkeit und des Querversatzes von Amplitudenänderungen der Anregungsgrößen und somit die Möglichkeit einer Superposition bestätigt werden. Der Einfluss der Amplitudenänderung auf die Peakwerte der Wankgeschwindigkeit zeigt sich hierbei wiederum als nicht-linear. Dies bestätigt die Darstellung der nicht-linearen Abhängigkeit der Wankbewegung von den Amplituden der Anregungsgrößen in Abbildung 5.7.

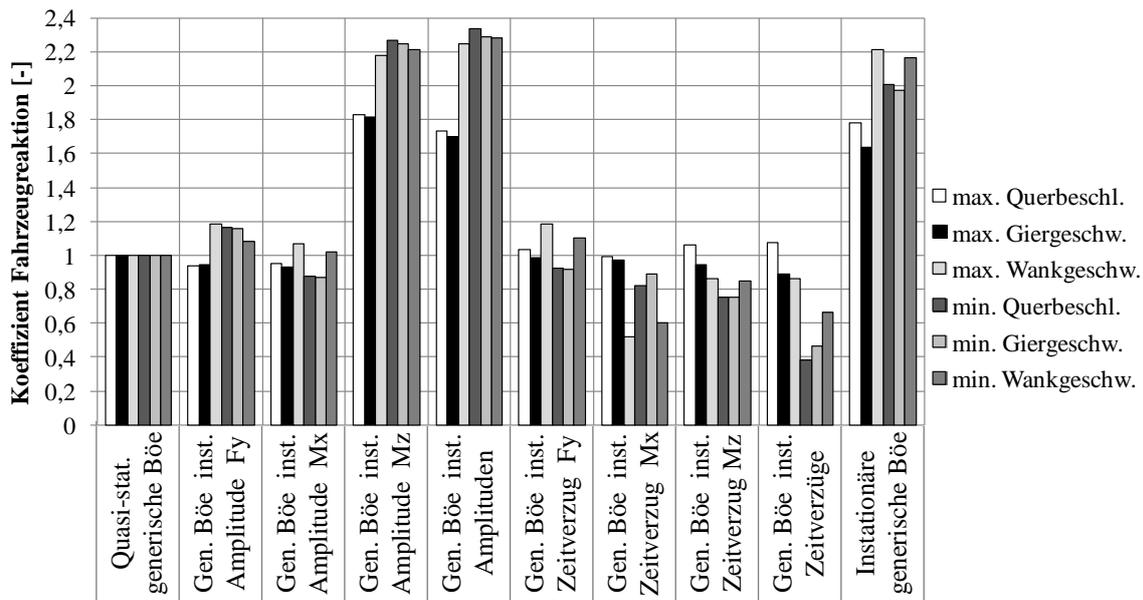


Abbildung 5.29.: Fahrzeugantwort bei einer schrittweisen Änderung einer stationären generischen Seitenwindböe entsprechend instationärer Kenngrößen

Im Folgenden wird auf die schrittweise Untersuchung der Einflussgröße von Zeitverzügen der aerodynamischen Anregungsgrößen auf die Fahrzeugreaktion eingegangen. Dazu wurde die Fahrzeugreaktion wieder zunächst mit Zeitverzügen einzelner Anregungsgrößen bestimmt. Betrachtet man den Einfluss eines 40ms Zeitverzuges des Peakwertes der aerodynamischen Seitenkraft, so zeigen sich nur geringfügige Änderungen der Fahrzeugantwort. Die Fahrzeugantwort weicht hier in etwa 8 % bezüglich der minimalen Querbeschleunigung und Giergeschwindigkeit im Vergleich zur quasi-stationären Anregung ab. Die Peakwerte der Wankgeschwindigkeit zeigen eine 18 % Änderung der Maximal- und eine 10 % Änderung der Minimalwerte. Ein Zeitverzug des Wankmoments von 110 ms führt kaum zu einer Veränderung der maximalen Querbeschleunigung und Giergeschwindigkeit. Jedoch ist eine Verringerung der VRCs der minimalen Querbeschleunigung um 18 %, der minimalen Giergeschwindigkeit um 11 %, der maximalen Wankgeschwindigkeit um 40 % und der minimalen Wankgeschwindigkeit um 50 % festzustellen. Ein Zeitverzug von -80ms des maximalen Giermoments zeigt eine 6 % höhere maximale Querbeschleunigung beziehungsweise 5 % niedrigere maximale Giergeschwindigkeit. Zudem ist eine 25 % geringere minimale Querbeschleunigung und Giergeschwindigkeit sowie eine 15 % geringere maximale und minimale Wankgeschwindigkeit im Vergleich zur Antwort auf die quasi-stationäre Anregung festzustellen.

Betrachtet man die Fahrzeugantwort auf eine quasi-stationäre Seitenwindböe mit den Zeitverzügen der instationären Anregung für die drei Größen Seitenkraft, Wankmoment und Giermoment, so zeigt sich eine deutliche Änderung der Fahrzeugreaktion. Die maximale Querbeschleunigung ist dabei um 8 % höher, die maximale Giergeschwindigkeit um 11 % und die maximale Wankgeschwindigkeit um 14 % geringer als die Antwort auf die quasi-stationäre Anregung. Die minimale Querbeschleunigung ist um 62 %, die minimale Giergeschwindigkeit um 53 % und die minimale Wankgeschwindigkeit um 34 % geringer. Vergleicht man die Fahrzeugantwort bei

einzelnen Zeitverzügen der definierten aerodynamisch Kenngrößen mit der Antwort auf Anregungen kombinierter Zeitverzüge so wird deutlich, dass der Einfluss von Zeitverzügen auf die maximale Querschleunigung und Giergeschwindigkeit für den hier betrachteten Wertebereich entsprechend Abbildung 5.20 und Abbildung 5.21 nur in Näherung als linear betrachtet werden kann.

Durch die Gegenüberstellung der Fahrzeugantwort bei einer quasi-stationären Seitenwindböe mit der Fahrzeugantwort unter Einfluss der generischen Seitenwindböe mit instationären Charakteristika entsprechend Tabelle 5.4 wird die Relevanz instationärer aerodynamischer Kenngrößen für die Fahrdynamik ersichtlich. Die maximale Querschleunigung ist hierbei um 78 %, die maximale Giergeschwindigkeit um 64 % und die maximale Wankgeschwindigkeit um 120 % größer als die Fahrzeugantwort bei Anregung mit der generischen, quasi-stationären Seitenwindböe. Die Fahrzeugreaktion der minimalen Querschleunigung sowie der minimalen Giergeschwindigkeit ist um zirka 100 % größer. Die minimale Wankgeschwindigkeit zeigt eine Überhöhung um mehr als 116 %. Durch die schrittweise Untersuchung der Einflussgröße instationärer aerodynamischer Charakteristika kann bei der vorliegenden generischen Seitenwindböe die Amplitudenänderung des Giermomentes als Haupteinflussfaktor der instationären Anregung auf die Fahrzeugantwort identifiziert werden.

## 6. Einfluss des Fahrwerks auf die Fahrzeugreaktion

Nach der Einflussanalyse der Charakteristika einer aerodynamischen Anregung auf die Fahrzeugreaktion gilt es nun, die relevanten Kenngrößen zur Beeinflussung des Seitenwindverhaltens seitens des Fahrwerks zu ermitteln. Ziel ist es dabei, die für das Störungsverhalten von Personenkraftwagen maßgeblichen Fahrwerksparameter zu identifizieren. Aus den festgestellten Zusammenhängen sind Stellhebel abzuleiten, die im Rahmen einer Grundausslegung des Fahrzeuges zur Optimierung des Seitenwindverhaltens gestaltet werden können.

Zur Bewertung der Einflussgröße von Fahrzeug- bzw. Fahrwerksparametern sind quantifizierbare und vor allem vergleichbare Kenngrößen der Parametersensitivität zu realisieren. Dazu wird eine systematische Methodik nach [71] für eine simulative Analyse der Einflussgröße der Fahrzeug- und Fahrwerkskenngrößen auf objektive Kenngrößen der Fahrdynamikeigenschaften durchgeführt. Um eine möglichst umfangreiche Analyse der Abhängigkeiten durchführen zu können, wurde ein Großteil der folgenden Untersuchungen mit dem in Abschnitt 4.2 beschriebenen Zweispurmodell entsprechend der Beschreibung in [46] durchgeführt. Detailuntersuchungen der Einflussgröße von spezifischen Fahrwerksbauteilen wurden über die simulative Abbildung im MKS-Modell aus Abschnitt 4.3 realisiert.

Um die Auswirkungen unterschiedlicher aerodynamischer Anregungsarten auf die Einflussgröße von Fahrzeug- und Fahrwerksparametern auf die Fahrzeugreaktion zu untersuchen, werden im Folgenden die Einflussfaktoren der beiden aerodynamischen Anregungsniveaus untersucht. Hierbei werden die Niveaus der aerodynamischen Anregung eines Starkwindes, durch die Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage, sowie einer durchschnittlichen aerodynamischen Seitenwindstörung, durch die generische, aerodynamische Seitenwindböe geringerer Anregungsamplitude betrachtet. Dazu werden die Anregungsverläufe nach Abbildung 3.3 (a) und (b) im Rahmen der Untersuchungen vorgegeben.

Da die Einflussgröße der Fahrzeug- und Fahrwerksparameter auf die Fahrzeugreaktion bei Anregung durch eine instationäre Seitenwindböe von besonderem Interesse ist, wird im Rahmen der vorliegenden Untersuchung zur Einflussanalyse einzelner Fahrwerksparameter eine generische Seitenwindböe mit Zeitverzügen der Anregungsverläufe von Seitenkraft, Wankmoment und Giermoment vorgegeben.

Die für die Untersuchung durchgeführten Simulationsmanöver wurden entsprechend der Beschreibung in Kapitel 4 umgesetzt. Der Wert des konstanten Lenkradwinkels sowie der Gaspedalstellung wird im Rahmen der Manöversimulation auch hierbei so vorgegeben, dass eine Geradeausfahrt des virtuellen Fahrzeuges bei konstanter Geschwindigkeit vor Auftreten der aerodynamischen Störung realisiert wird. Dabei wird die Fahrzeugreaktion auch hierbei in einem Open-Loop Manöver, somit ohne den Einfluss der Lenkwinkleingabe durch den Fahrer, bei

festgehaltenem Lenkradwinkel (fixed-control) berechnet. Die Fahrzeuggeschwindigkeit beträgt für die systematische Untersuchung der Parametersensitivität  $v_{Fzg} = 140 \text{ km/h}$ . Im folgenden Abschnitt wird eine Methodik zur Ermittlung von Sensitivitätsindices der Fahrzeug- und Fahrwerksparameter erläutert sowie eine Darstellungsform zur Auswertung und Gegenüberstellung der Ergebnisse aufgezeigt.

### 6.1. Beschreibung der Analysemethodik

Um quantifizierbare Aussagen zum Vergleich der Einflussgröße von Fahrzeugparametern zu ermitteln wird ein Sensitivitätsindex berechnet. Die Berechnung eines parameterspezifischen, jedoch dimensionslosen Kennwertes ermöglicht dabei die Quantifizierung der Stellhebel der Fahrzeug- und Fahrwerksparameter, sowie eine übersichtliche Gegenüberstellung der Einflussgrößen nach [46]. Nur durch eine quantifizierbare Kenngröße sind die relevanten Stellhebel der Fahrwerksauslegung zur Beeinflussung des Störungsverhaltens erkennbar.

#### 6.1.1. Berechnung der Einflussgröße der Fahrzeugparameter

Zur Berechnung eines vergleichbaren Wertes der Einflussgröße von Fahrzeug- und Fahrwerksparametern gilt es, eine unabhängige, dimensionslose Kenngröße zu bestimmen. Dazu wird ein Sensitivitätsindex SI berechnet. Der SI wird dabei aus der Änderung der charakteristischen Größe der Fahrzeugbewegung CV und der Änderung des jeweiligen Fahrwerk- bzw. Fahrzeugparameters FP wie folgt nach Gleichung (6.1) ermittelt.

$$SI_{kl} = \frac{\Delta CV_l}{\Delta FP_k} \quad (6.1)$$

Der Wert der prozentualen Änderung des betrachteten Fahrzeug- bzw. Fahrwerksparameters wird nach (6.2) berechnet. Die Änderung der Parameter bezieht sich auf den Wert des Basisdatensatz des betrachteten Fahrzeuges. Die geänderten Parameter sind sowohl Skalare, als auch Kenngrößen zur Beschreibung von Kennlinien und Kennfeldern der Modellparametrierung.

$$\Delta FP_k = \frac{FP_k - FP_{R,k}}{FP_{R,k}} \quad (6.2)$$

Die prozentuale Änderung der CVs berechnet sich dabei aus der Gegenüberstellung Änderung der charakteristischen Größen der Fahrzeugbewegung durch den geänderten Parametersatz zu charakteristischen Größen aus der Berechnung der Fahrzeugantwort mit dem Basisdatensatz nach Gleichung (6.3) ermittelt.

$$\Delta CV_l = \frac{CV_l - CV_{R,l}}{CV_{R,l}} \quad (6.3)$$

In der folgenden Abbildung 6.1 ist die Bestimmung des Sensitivitätsindex SI einer Änderung eines Fahrzeug- und Fahrwerksparameter um  $\epsilon$  grafisch dargestellt. Bei der Betrachtung des hier abgebildeten Zusammenhangs wird deutlich, dass etwaige Linearisierungsfehler bei der Bestimmung der SIs und somit bei der Einflussanalyse zu vermeiden sind. Deshalb wird im

Rahmen der Gegenüberstellung des Parametereinflusses nur eine kleine Variationsbreite der Parameteränderung des Fahrzeugs und des Fahrwerks untersucht. Im Folgenden werden dazu die Fahrzeugkenngrößen generisch um  $+/- \epsilon$  variiert. Zur Identifikation eines möglichen Linearisierungsfehlers, werden dabei die Sensitivitätsindices einer positiven Änderung um  $+\epsilon$  mit denen einer negativen Änderung um  $-\epsilon$  verglichen. Weisen die hierbei ermittelten Werte der SIs deutliche Abweichungen auf, so sind nicht-lineare Abhängigkeit der Fahrzeugreaktion von den Fahrzeug- und Fahrwerksparametern anzunehmen.

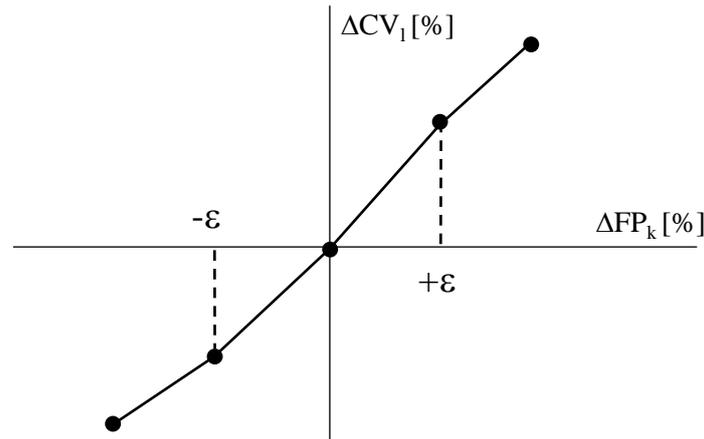


Abbildung 6.1.: Ableitung des Sensitivitätsindex SI zur Ermittlung der Einflussgröße von Fahrzeug- und Fahrwerkparametern

Um eine allgemeine Aussage zum Einfluss von Fahrzeug- und Fahrwerksparametern auf die Fahrzeugreaktion unter Seitenwindanregung zu generieren, wird ein Mittelwert der Sensitivitätsindices  $\bar{x}_{SI, CV}$  über alle betrachteten CVs nach (6.4) gebildet.

$$\bar{x}_{SI, CV_i} = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m SI_{kl} \quad (6.4)$$

Dabei kann ein derartiger Mittelwert auch für eine Auswahl der Sensitivitätsindices  $n = a$  festgelegter Bewegungsgrößen realisiert werden. Über einen Gewichtungsfaktor  $\mu_l$  kann hierbei die Einflussgröße einzelner SIs der Fahrwerksparameter FPs bzw. der charakteristischen Kenngrößen CVs zur Berechnung eines gewichteten Mittelwertes der SIs vorgegeben werden. Dies kann z.B. für eine Priorisierung der zu betrachtenden CVs auf Basis der subjektiven Wahrnehmung durch den Fahrer genutzt werden. Gleichung 6.5 zeigt dazu die Berechnung des gewichteten Mittelwertes der SIs.

$$\bar{x}_{SI, \mu CV_i} = \frac{1}{m} \sum_{n=1}^m \mu_l SI_{kl} \quad (6.5)$$

Durch die Vorgabe einer übergreifenden Parametervariation um den identischen Faktor  $\epsilon$  ist es möglich, prozentuale Änderungen der einzelnen Stellhebel gegenüber zu stellen. Inwiefern ein Parameter im betrachteten Fahrzeugmodell in der Grundauslegung geändert werden kann, wird aus einer derartigen Gegenüberstellung nicht ersichtlich. Es könnte sein, dass ein Parameter  $FP_1$

hierbei einen doppelt so hohen  $SI_{FP_1,l}$  im Vergleich zu  $FP_2$  aufweist, jedoch  $FP_2$  im Fahrzeug um das Vierfache variiert werden kann. Bei dieser Betrachtung würde der Parameter  $FP_2$  in der Grundausslegung als der „größere“ Stellhebel betrachtet werden.

Um eine mögliche Variation der Fahrzeug- und Fahrwerksparameter zu betrachten, wird ein auf eine Variationsbreite normierter Wert  $VSI_{Var}$  bestimmt. Dazu wird die Streuung der Fahrzeug- und Fahrwerksparameter von Fahrzeugen der gleichen Klasse ermittelt. Nach Gleichung (6.6) wird eine obere bzw. nach Gleichung (6.7) eine untere Grenze einer Streubreite der Fahrzeugauswahl ermittelt.

$$\eta_{pos, CV_i, h} = \frac{CV_{i, ref} + \max(CV_i, h)}{0.1 CV_{i, ref}} \quad (6.6)$$

$$\eta_{neg, CV_i, h} = \frac{CV_{i, ref} - \min(CV_i, h)}{0.1 CV_{i, ref}} \quad (6.7)$$

Daraus wird ein Faktor der Variationsbreite  $\eta_{CV_i, h}$  eines Fahrzeug- bzw. Fahrwerksparameters  $FP_k$  entsprechend (6.8) bestimmt. Neben den hier beschriebenen Streuungen über eine Auswahl von Fahrzeugen, können zudem die Fahrzeug- bzw. Fahrwerksparameter eines spezifischen Fahrzeuges deutlich variieren. Durch Phänomene wie z.B. einer Gewichtsänderung durch Zuladung in Form von zusätzlichen Dachlasten, dem Gewichtsunterschied zwischen vollem und leerem Kraftstofftank, einer Abnutzung des Reifenprofils oder einer Alterung des Reifenmaterials beziehungsweise einzelner Elastomerbauteile wie Gummilager kommt es zu einer signifikanten Streuung der Fahrzeug- und Fahrwerksparameter eines Fahrzeugs.

$$\eta_{CV_i, h} = \frac{\eta_{pos, CV_i, h} - \eta_{neg, CV_i, h}}{2} \quad (6.8)$$

Zur Berechnung des auf die Streubreite bezogenen Sensitivitätsindex  $VSI_{kl}$  werden die SI mit den Faktoren  $\eta_{CV_i, h}$  multipliziert (6.9).

$$VSI_{kl} = \eta_{CV_i, h} SI_{kl} \quad (6.9)$$

Die ermittelten VSIs können auch hier analog Gleichung (6.5) zur Berechnung eines Mittelwertes der VSIs einer Auswahl relevanter  $CV_i$  genutzt werden.

### 6.1.2. Graphische Darstellung der Einflussgröße

Zur Auswertung der berechneten Sensitivitätsindices werden die Kenngrößen der  $SI_{kl}$  zum Einen über Balkendiagramme für die betrachteten Freiheitsgrade der Aufbaubewegung  $l$  gegenübergestellt. Um eine grafische Auswertung umfangreicher Datensätze der berechneten SIs zu ermöglichen, wird darüberhinaus eine Darstellung gewählt, mit der eine übersichtliche Gegenüberstellung der Einflussgrößen von zwei unterschiedlichen Manövern möglich ist. Dazu werden in einem Punktdiagramm die berechneten SIs der jeweiligen CVs bzw. eines Mittelwertes einer Auswahl von SIs auf der horizontalen und vertikalen Achse aufgetragen.

Durch die Position des Wertes des SIs, lässt sich die Einflussgröße des jeweiligen Fahrzeug- bzw. Fahrwerksparameters  $FP_k$  ablesen. Je näher der SI im Ursprung des Koordinatensystems zu finden ist, umso geringer ist die Einflussgröße auf die betrachteten Bewegungskenngrößen.

Befindet sich der SIs auf der Winkelhalbierenden des ersten und dritten Quadranten des Koordinatensystems, so ist die Einflussgröße des betrachteten Parameters in beiden gegenübergestellten Manövern identisch.

Negative Werte der  $SI_{kl}$  zeigen eine Erhöhung der Fahrzeugantwort des betrachteten  $CV_i$  bei Erhöhung des entsprechenden  $FP_k$  und somit eine Verschlechterung des Störungsverhaltens. Positive Werte der SIs zeigen eine Verringerung der Fahrzeugantwort auf. Werden SIs im zweiten und vierten Quadranten des Koordinatensystems aufgetragen, würden Änderungen der entsprechenden Fahrzeug- oder Fahrwerksparametern zu Zielkonflikten bei der zielgerichteten Ausprägung des Fahrzeuges in den betrachteten Fahrzeugmanövern führen. Eine Änderung des Parameters würde in diesem Fall das Fahrzeugverhalten des einen Manövers verbessern und gleichzeitig das Fahrzeugverhalten des anderen Manövers verschlechtern. Abbildung 6.2 zeigt eine Erläuterung der graphischen Darstellung der Einflussgröße von Parameteränderung auf das Seitenwindverhalten.

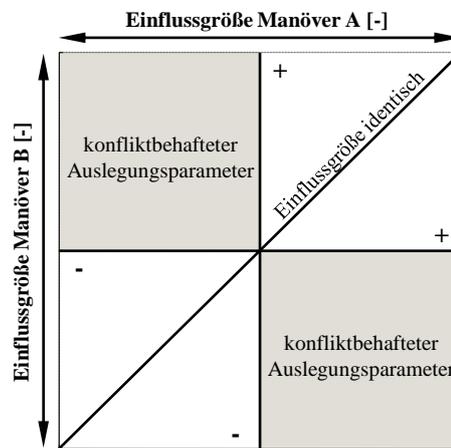


Abbildung 6.2.: Erläuterung zur graphischen Darstellung der Einflussgröße von Fahrzeug- und Fahrwerksparametern

Bei Gegenüberstellung der Sensitivitätsindices ist vor allem der Relativvergleich der Einflussgröße von Interesse. In den folgenden Darstellungen sind die Werte der Sensitivitätsindices normiert. Der im Rahmen der Untersuchungen dargestellte Wertebereich der SIs wird somit durch eine Angabe der Minimal- und Maximalwerte von -1 bis +1 ersetzt. Da der Umrechnungsfaktor für die Normierung bei allen Darstellungen der SIs und VSIs identisch ist, können die Werte der Sensitivitätsindices unterschiedlicher Abbildungen miteinander verglichen und in Relation gesetzt werden. Um eine übersichtliche Darstellung einer großen Anzahl betrachteter SIs und VSIs zu realisieren, werden Sensitivitätsindices  $SI_k < 1/15$  und Sensitivitätsindices der Varianzbreite  $VSI_k < 1/16$  aufgrund der zu vernachlässigenden Relevanz für die Fahrzeugreaktion nicht dargestellt.

## 6.2. Ergebnisse der Stellhebelanalyse der Fahrzeugparameter

Im Folgenden werden die Ergebnisse einer Einflussanalyse der Fahrzeug- und Fahrwerksparameter auf das Störungsverhalten von Personenkraftwagen am Beispiel eines Fahrzeuges der obe-

ren Mittelklasse V3 sowie an einem Sports-Utility-Vehicle (SUV) V7 exemplarisch dargestellt. Dazu werden 274 verschiedene Fahrzeug- und Fahrwerksparameter der folgenden Kategorien singular und teilweise auch in Kombination variiert. Der Einfluss einer Parametrierung der Reifenmodellierung wird in den folgenden Darstellungen jeweils im Einzelnen und in Kombination untersucht. Die hierbei als „Gesamtfahrzeugparameter“ bezeichnete Kategorie wird in der Literatur zudem auch als „Grundauslegungsparameter“ oder „Fahrzeuggene“ bezeichnet. Um die hierbei ermittelte Einflussgröße der Fahrzeugparameter auf die Fahrzeugreaktion  $SI_{kl}$  in Relation zum Einflussfaktor einer Amplitudenänderung der aerodynamischen Anregungsgrößen  $EF_{ml}$  aus Abschnitt 5.1 zu setzen, wird neben den SIs der Fahrzeugparameter nochmals der Einfluss einer Änderung der maximalen Amplitude aerodynamischer Anregungsgrößen wie das Giermoment oder die Auftriebskraft an Vorder- und Hinterachse aufgezeigt.

### Kategorien der untersuchten Fahrzeug- und Fahrwerksparameter:

- Reifenparameter Vorder-/Hinterachse einzeln
- Reifenparameter Vorder-/Hinterachse in Kombination
- Gesamtfahrzeugparameter
- Federung/Dämpfung Vorder-/Hinterachse einzeln
- Elasto-/Kinematik Vorder-/Hinterachse einzeln
- aerodynamische Kennzahl

Aus den betrachteten Parametern der genannten Kategorien gilt es, relevante Stellhebel zur Beeinflussung des Seitenwindverhaltens von Personenkraftwagen abzuleiten. Der Parametereinfluss bei unterschiedlichen Anregungsniveaus wird durch Gegenüberstellung der berechneten SIs entsprechend der Darstellung aus Abschnitt 6.1.2 betrachtet. Aufgrund der Erkenntnisse zur Einflussgröße der Zusammensetzung von aerodynamischen Anregungen auf die Fahrzeugreaktion wird dabei auf die spezifische Unterscheidung einer generischen, aerodynamischen Anregung geringerer Anregungsamplitude mit und ohne Vorzeichenwechsel verzichtet.

Zunächst wird eine vergleichbare Kenngröße des Parametereinflusses bestimmt. Dazu werden die jeweiligen Fahrzeug- und Fahrwerksparameter um  $\epsilon = +/- 10\%$  der Werte des Basisparametersatzes variiert. In einem weiteren Abschnitt wird eine Variationsbreite der Fahrzeug- und Fahrwerksparameter der jeweiligen Fahrzeugklasse nach Gleichung (6.9) in die Bewertung der relevanten Stellhebel miteinbezogen. Auch hierbei werden die Ergebnisse der  $VSI_{kl}$  für unterschiedliche Anregungsniveaus der aerodynamischen Störung gegenübergestellt.

### 6.2.1. Einfluss von Parameteränderungen gleicher Größenordnung

Zur Analyse der Einflussgröße der Fahrzeug- und Fahrwerksparameter auf das Seitenwindverhalten wird eine allgemeine Aussage zu den relevanten Stellhebel abgeleitet. Dabei werden die unterschiedlichen Anregungsniveaus der aerodynamischen Anregung betrachtet. Zur Ableitung einer allgemeinen Aussage werden die Mittelwerte der SIs aller relevanten, durch den Fahrer wahrnehmbaren CVs bei Anregung durch Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage sowie durch eine generische, quasi-stationäre Böe nach beschriebener Darstellungsmethode aufgetragen. Der

Gewichtungsfaktor der einzelnen CVs beträgt in diesem Fall  $\mu_l = 1$ . Abbildung 6.3 zeigt die Mittelwerte der Sensitivitätsindices bei einer Anregung durch Vorbeifahrt die Seitenwindanlage und bei Anregung durch eine generische, quasi-stationäre Böe.

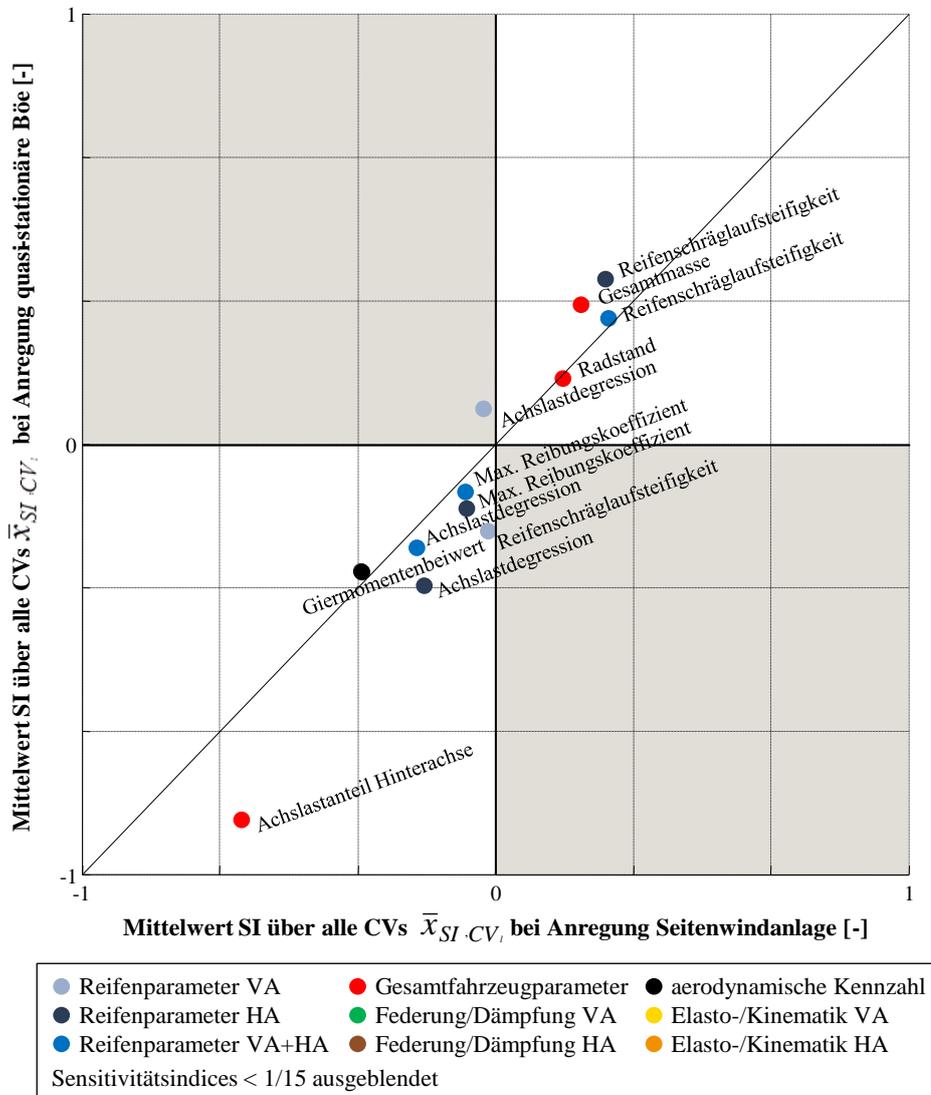


Abbildung 6.3.: Mittelung SI  $\bar{x}_{SI, CV_i}$  bei Anregung des Fahrzeugs V3 durch eine Seitenwindanlage sowie durch eine quasi-stationäre Böe QSG

Hierbei sind SIs der Kategorien der Reifenparameter, der Gesamtfahrzeugparameter und der aerodynamischen Kenngrößen dargestellt. Die SIs der anderen Parameterkategorien des Feder-Dämpfer-Systems bzw. der Elasto-Kinematik an Vorder- und Hinterachse sind aufgrund eines berechneten Wertes  $< 1/15$  nicht aufgetragen. Besonders auffällig ist die Größenordnung des SIs des Achslastanteils an der Hinterachse. Aufgrund der Abweichung von der Winkelhalbierenden, zeigt dieser Parameter für eine Anregung durch eine generische, aerodynamische Böe geringerer Anregungsamplitude einen höheren Einfluss als bei Anregung durch die Seitenwindanlage. Da der Wert hier negativ aufgetragen ist, führt eine Erhöhung der Achslast an der Hinterachse zu

einer Erhöhung der Fahrzeugantwort, und somit zur Verschlechterung des Seitenwindverhaltens. Die hier beschriebene Abhängigkeit sowie die berechnete Einflussgröße des SIs deckt sich mit den qualitativen Beschreibungen der Literatur nach Tabelle 2.3.

Zusätzlich zu den in der Literatur dokumentierten Einflussfaktoren des Seitenwindverhaltens lässt sich durch die vorliegenden Untersuchungsergebnisse die Einflussgröße der Fahrzeug- und Fahrwerksparameter entsprechend der Art der aerodynamischen Anregung quantifizieren und in Relation setzen. Der aufgetragene SI der Achslastverteilung ist mehr als doppelt so groß wie der nächst kleinere SI. Als weitere relevante Stellhebel sind die Schräglaufsteifigkeit, die Achslastdegression und der maximale Reibwert des Reifens sowie die Gesamtmasse und der Radstand aufgetragen. In der Literatur ist der Stellhebel der Schräglaufsteifigkeit zur Beeinflussung des Seitenwindverhaltens auch als relevant beschrieben. Betrachtet man die Größenordnung des SIs einer 10 %-Änderung des aerodynamischen Giermomentes, so ist der ermittelte Wert um zirka 70% geringer als der SI der Achslast an der Hinterachse. Dies bedeutet, dass bei der gleichen prozentualen Änderung der einzelnen Kenngrößen, die Änderung der Achslast an der Hinterachse zu einer in Näherung dreimal höheren Änderung der Fahrzeugreaktion führt.

Die aufgetragenen SIs zeigen eine Ausrichtung entlang der Winkelhalbierenden des ersten und dritten Quadranten. Einige SIs, vor allem der Reifenparameter, zeigen Unterschiede der Einflussgröße bei Gegenüberstellung der beiden aerodynamischen Anregungsniveaus. Dabei sind die SIs bei Anregungen durch die generische Seitenwindböe geringerer Anregungsgröße geringfügig höher. Die identifizierten Unterschiede sind durch die Degression der nicht-linearen Kennlinien der Reifenmodellierung in Abhängigkeit der auftretenden Lasten begründet. Jedoch lässt sich die Einflussgröße von Fahrzeug- und Fahrwerksparametern auf die Fahrzeugreaktion bei Anregung durch die beiden untersuchten Anregungsniveaus in Näherung als Einflüsse gleicher Größenordnung einordnen.

Bei der vorliegenden Mittlung über alle durch den Fahrer wahrnehmbaren Bewegungsgrößen lässt sich im zweiten und vierten Quadrant der Grafik nur der Sensitivitätsindex der Achslastdegression des Reifens an der Vorderachse mit einer geringen Größenordnung feststellen. Alle weiteren, relevanten Fahrzeug- und Fahrwerksparameter ( $SI > 1/15$ ) weisen somit einen im Mittel konfliktfreien Einfluss auf das Störungsverhalten bei einer aerodynamischen Anregung durch Starkwinde und sowie durch Seitenwindböen durchschnittlicher Größenordnung auf.

Aus den Zusammenhängen lassen sich Erkenntnisse zum Nutzen einer Seitenwindanlage bei der Grundauslegung des Seitenwindverhaltens von Personenkraftwagen ableiten. An der Seitenwindanlage ist es trotz der hohen Strömungsgeschwindigkeit möglich, die Wirksamkeit einzelner Maßnahmen am Fahrzeug bzw. Fahrwerk zur Verbesserung des Seitenwindverhaltens bei Anregungen geringerer Größenordnung zu untersuchen und nachzuweisen. Somit kann eine Seitenwindanlage, durch Ableitung von Relativaussagen auch als Werkzeug zur Grundauslegung des Seitenwindverhaltens bei vergleichsweise kleinen Anregungen genutzt werden.

Im Folgenden soll die Übertragbarkeit der hier gewonnenen Erkenntnisse auf andere Fahrzeug- und Fahrwerksarchitekturen überprüft werden. Dazu werden die Ergebnisse einer Einflussanalyse des Störungsverhaltens eines Geländewagens (SUV) bei Anregung durch eine Seitenwindanlage sowie durch die generische, quasi-stationäre Böe betrachtet. Die Fahrzeug- und Fahrwerksparameter des Fahrzeugs V7 aus Kapitel 4 werden erneut um  $\epsilon = +/- 10\%$  der Werte

des Basisparametersatzes variiert. Abbildung 6.4 zeigt die Sensitivitätsindices der Mittelwerte der betrachteten, durch den Fahrer wahrnehmbaren, Bewegungsgrößen des Fahrzeugaufbaus.

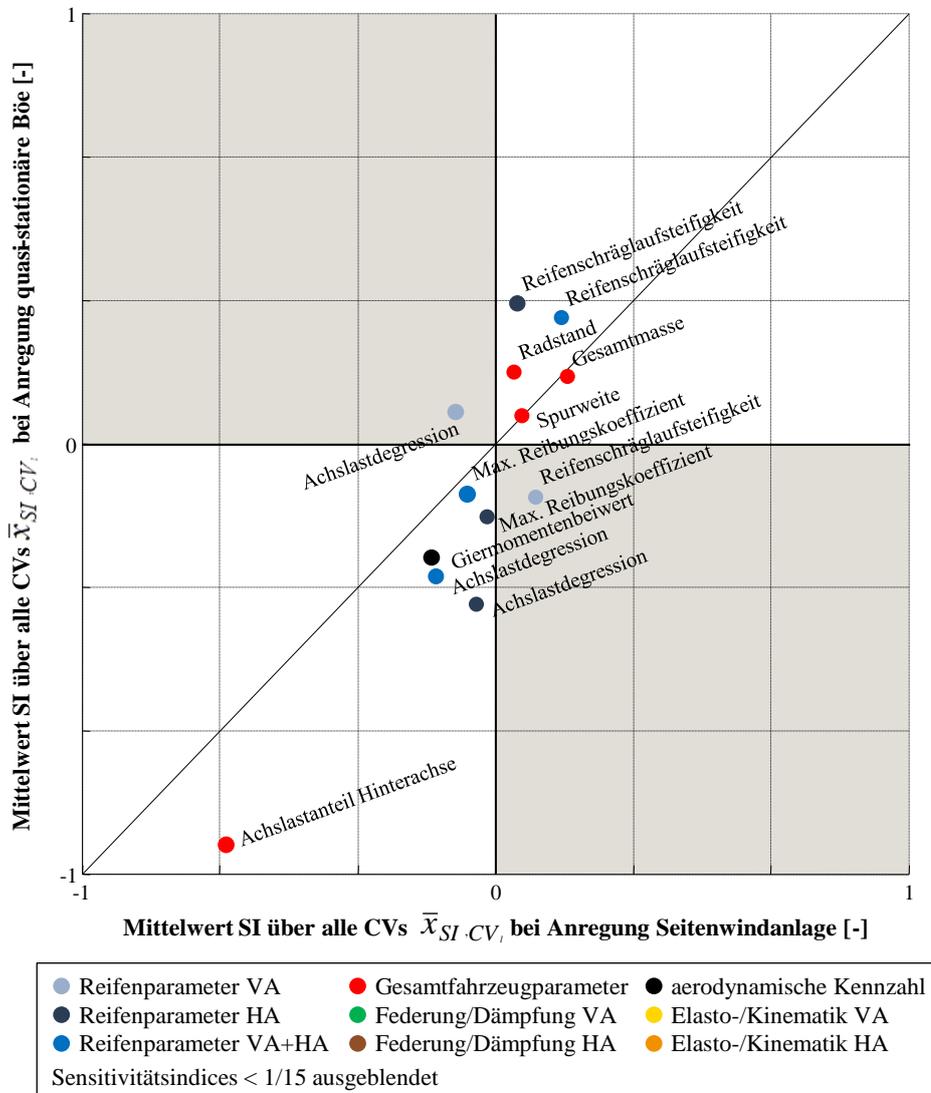


Abbildung 6.4.: Mittlung SI  $\bar{x}_{SI, CV_i}$  bei Anregung des Fahrzeugs V7 durch eine Seitenwindanlage sowie durch eine quasi-stationäre Böe QSG

Hierbei sind die gleichen Fahrzeugparameter wie in Abbildung 6.9 dargestellt. Die Streuung fällt jedoch in Abhängigkeit des Niveaus der aerodynamischen Anregung der betrachteten Manöver deutlich größer aus. Zudem zeigen Parameter der Reifenmodellierung an der Vorderachse einen konfliktären Charakter. In Näherung lässt sich jedoch der gleiche Einfluss von Parameteränderungen wie bei Fahrzeug V3 feststellen. Neben der Gegenüberstellung der Einflussgröße von Fahrzeugparametern unterschiedlicher Anregungsniveaus gilt es, die Abhängigkeit von der zeitlichen Zusammensetzung zu analysieren. Dazu werden die SIs einer Fahrzeugreaktion bei Anregung durch eine generische, aerodynamische Seitenwindböe mit Zeitverzügen zwischen den Anregungsgrößen berechnet. In Abbildung 6.5 sind die Mittelwerte der Sensitivitätsindices

## 6. Einfluss des Fahrwerks auf die Fahrzeugreaktion

vitätsindices des Fahrzeugs V3 bei einer Anregung durch eine generische, quasi-stationäre Seitenwindböe mit und ohne Zeitverzügen der Anregungsgrößen dargestellt.

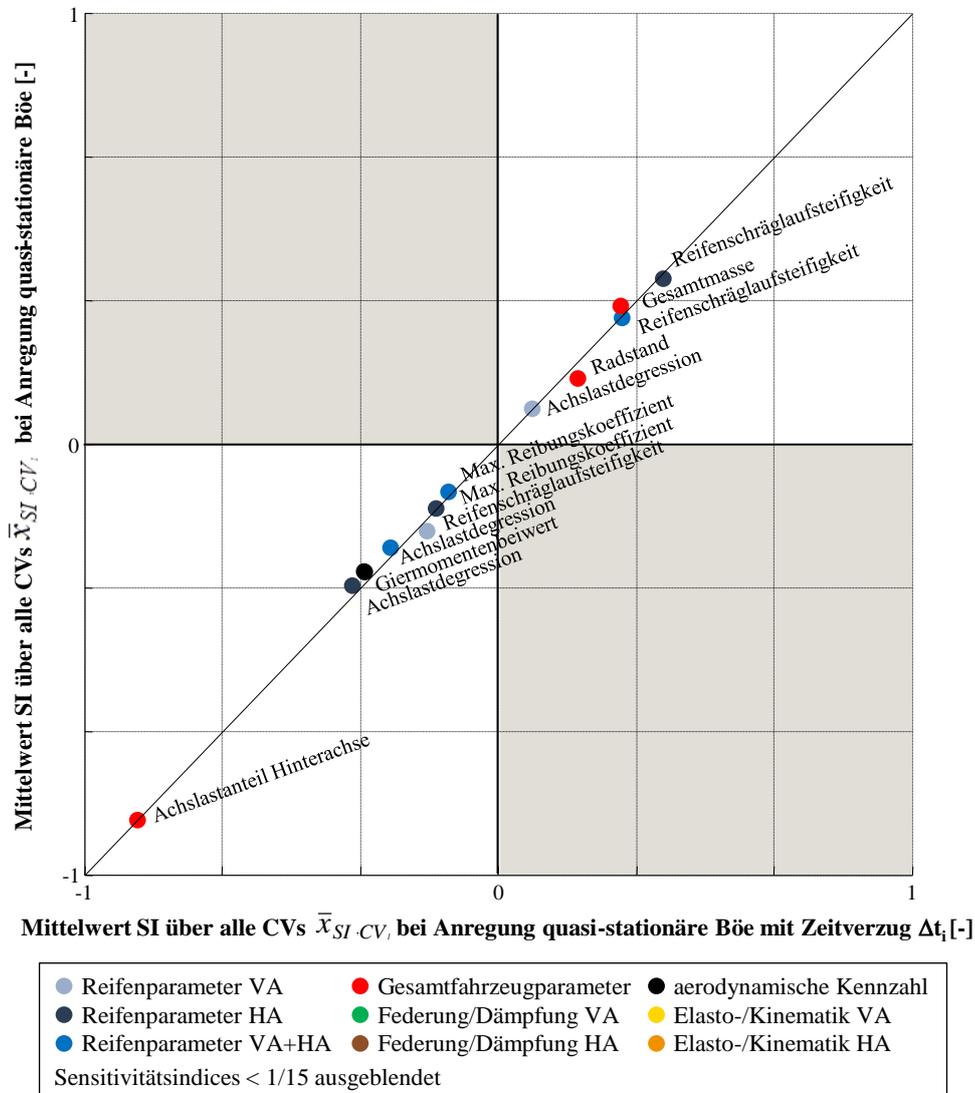


Abbildung 6.5.: Mittelung SI  $\bar{x}_{SI, CV_i}$  bei Anregung des Fahrzeugs V3 durch eine quasi-stationäre Böe QSG ohne sowie mit Zeitverzug der Anregungsgrößen

Die Größenordnung der gemittelten SIs beider Arten der aerodynamischen Anregung sind wie in Abbildung 6.3 miteinander vergleichbar. Die aufgetragenen SIs befinden sich dabei auf der Winkelhalbierenden des ersten und dritten Quadranten der Darstellung. Keiner der aufgeführten Fahrzeug- und Fahrwerksparameter zeigt eine signifikant unterschiedliche Einflussgröße auf die Fahrzeugantwort. Somit ist die relative Einflussgröße der singulären Änderung eines Fahrzeug- bzw. Fahrwerksparameters unabhängig vom Auftreten von Zeitverzügen der aerodynamischen Anregungsgrößen, bei einer Betrachtung der generischen transienten Seitenwindböe kleinerer Größenordnung. Zu den hier dargestellten, über alle Bewegungsgrößen gemittelten Sensitivitätsindices sind in Abbildung 6.6 die SIs für die Bewegungsgrößen der Quer-

beschleunigung des Fahrzeuges bei Anregung durch eine Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage sowie die Werte bei Anregung durch eine generische, quasi-stationäre Böe dargestellt.

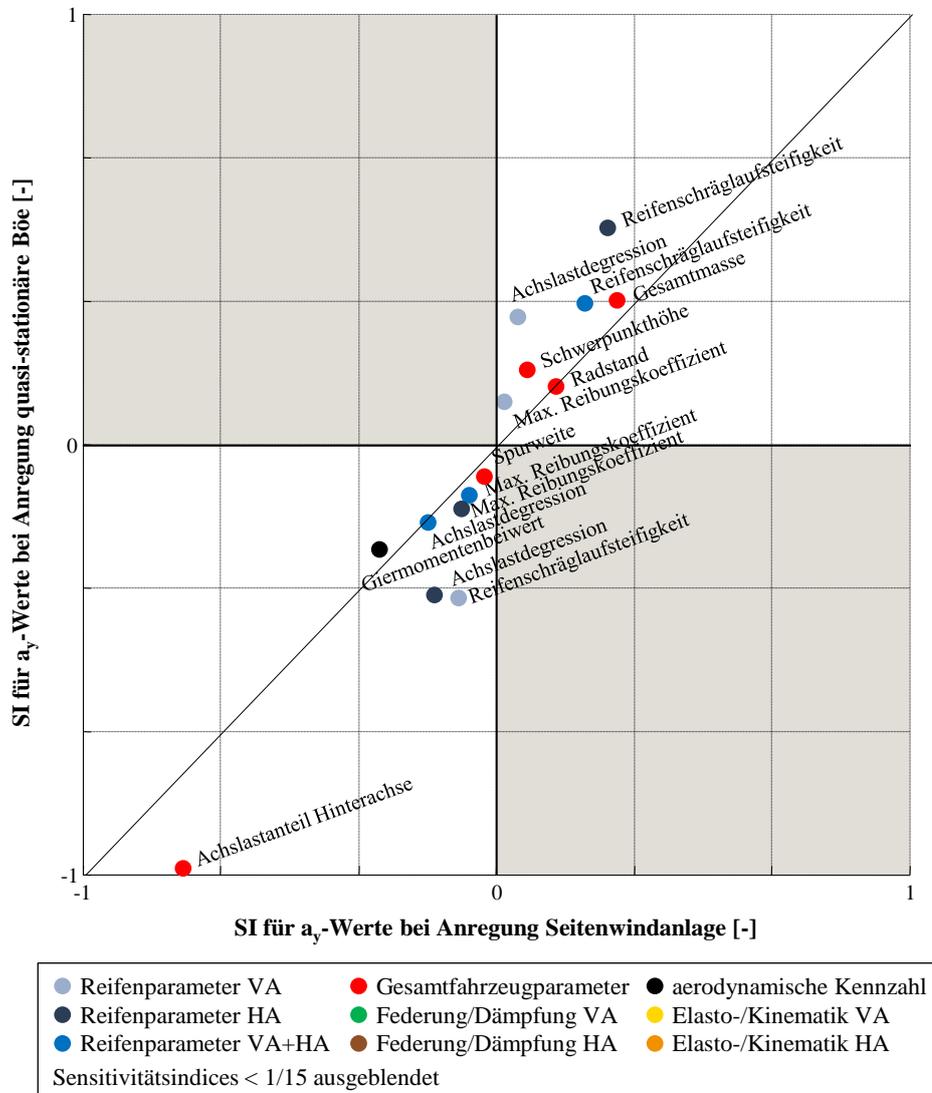


Abbildung 6.6.:  $SI_{a_y}$  bei Anregung des Fahrzeugs V3 durch eine Seitenwindanlage sowie durch eine quasi-stationäre Böe QSG ohne Zeitverzug der Anregung

Betrachtet man die hierbei aufgetragenen SIs der Querbewegung des Fahrzeuges, so zeigen sich Parameter der gleichen Kategorien wie in Abbildung 6.5. Auch hierbei sind die SIs der Reifenparameter, der Gesamtfahrzeugparameter sowie der aerodynamischen Kenngrößen abgebildet. Die SIs orientieren sich erneut entlang der Winkelhalbierenden des ersten und dritten Quadranten. Die Einflussgröße der Parameteränderungen kann somit für die Seitenwindanlage und bei Anregung durch eine Seitenwindböe geringer Anregungsamplitude für die Fahrzeugantwort der Querbewegung als ähnlich betrachtet werden. Lediglich die Parameter der Reifenschräglaufsteifigkeit, sowie die Achslastdegression der Reifenquerführung an Vorder- und Hinterachse zeigen einen quantitativ höheren Einfluss auf die Fahrzeugreaktion bei Anregung

## 6. Einfluss des Fahrwerks auf die Fahrzeugreaktion

durch eine geringe aerodynamische Anregung. Abbildung 6.7 zeigt zudem die SIs der Gierreaktion des Fahrzeuges bei Betrachtung der beiden aerodynamischen Anregungsniveaus.

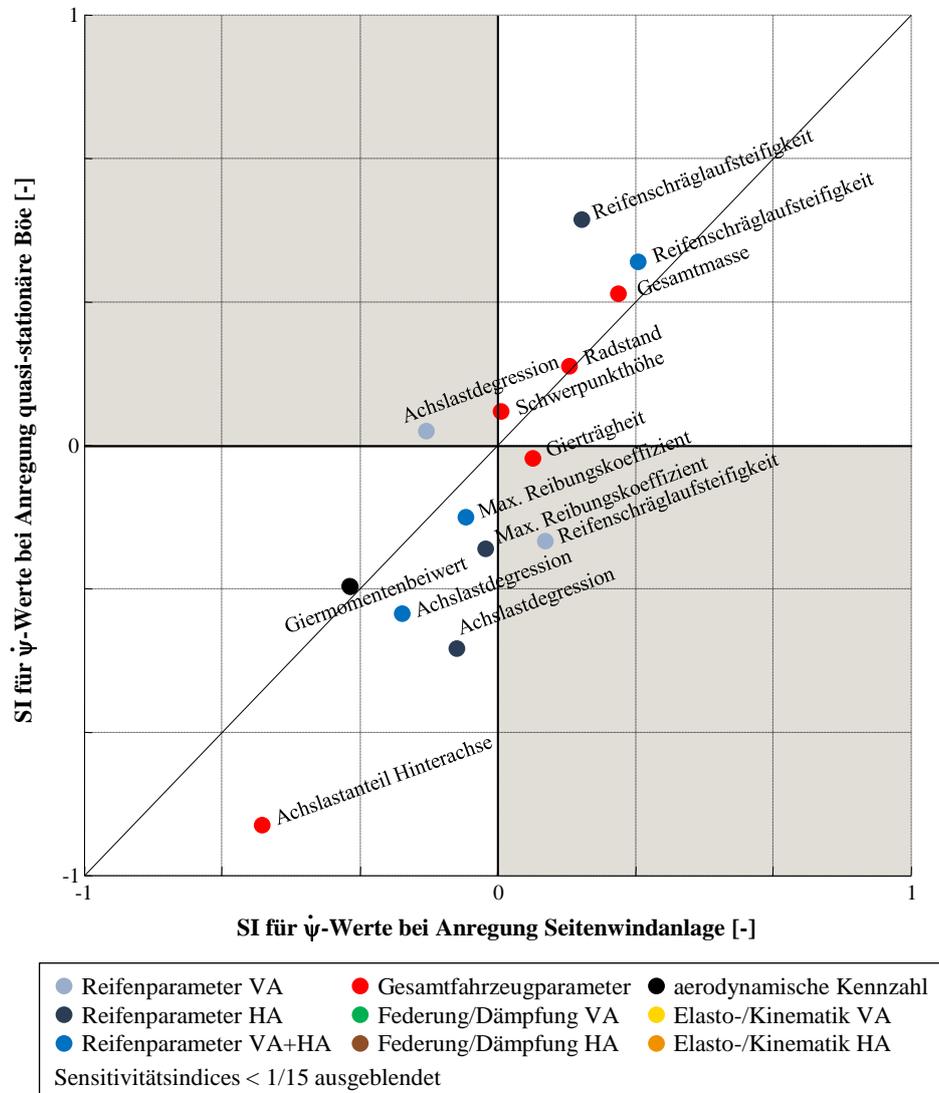


Abbildung 6.7.:  $SI_{\dot{\psi}}$  bei Anregung Seitenwindanlage sowie quasi-stationäre Böe QSG ohne Zeitverzug der Anregung

Auch hier sind hauptsächlich Parameter der Reifenkennlinien, der Gesamtfahrzeugparameter sowie der aerodynamischen Anregung aufgetragen. Die Einflussgröße der Fahrzeug- und Fahrwerksparameter variiert hierbei jedoch deutlicher in Abhängigkeit der betrachteten aerodynamischen Anregung. Die Gierreaktion bei Anregung durch eine Seitenwindböe geringerer Amplitude zeigt einen überproportional höheren Einfluss der aufgetragenen FPs auf die Fahrzeugreaktion im Vergleich zur Einflussgröße auf die Fahrzeugantwort bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage. Die SIs der Schräglaufsteifigkeit sowie der Achslastdegression des Reifens an der Vorderachse zeigen eine unterschiedliche Einflussrichtung bezüglich der betrachteten Anregungsniveaus bei Auslegung der Gierreaktion. In folgender Abbildung 6.8 sind die SIs der Wan-

reaktion des Fahrzeuges bei einer Anregung durch eine Vorbeifahrt an der Seitenwindanlage und eine generische, quasi-stationäre Böe QSG aufgeführt.

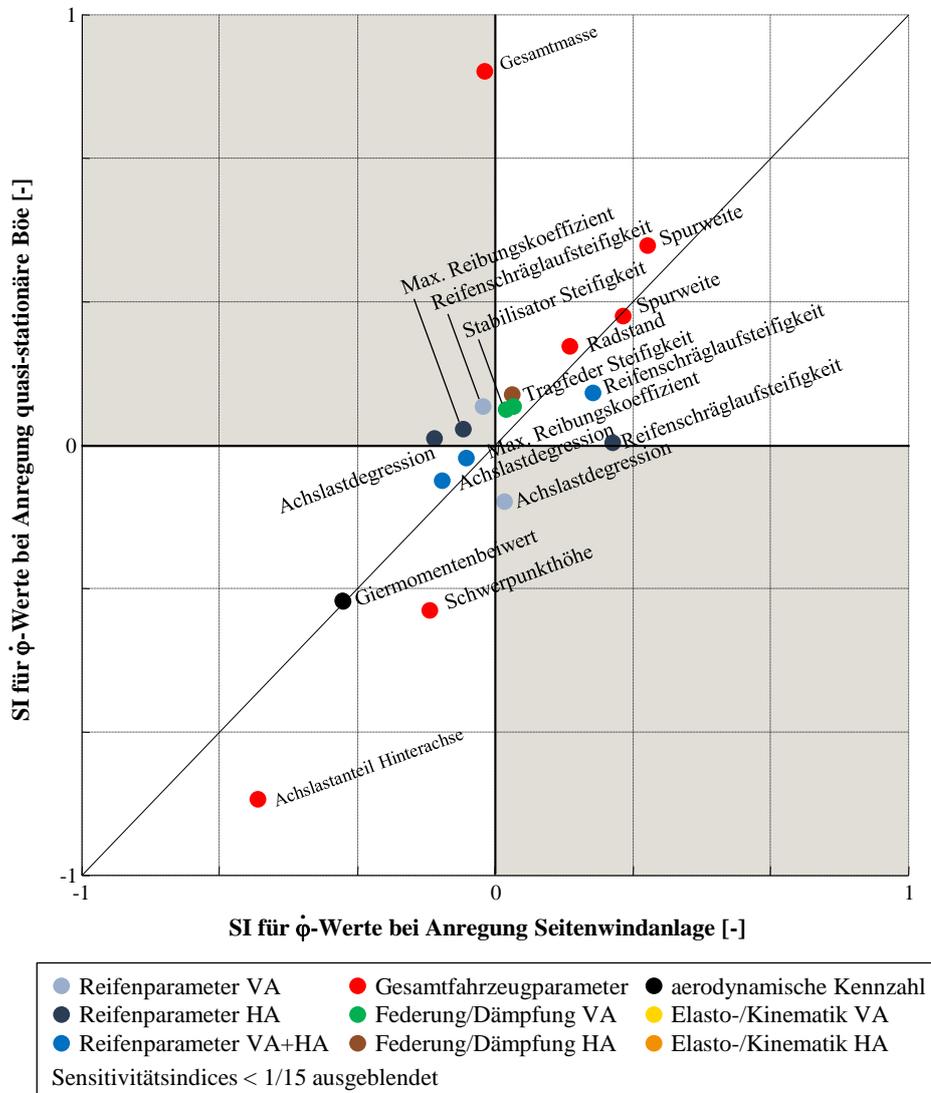


Abbildung 6.8.:  $SI_{\dot{\psi}}$  bei Anregung Seitenwindanlage sowie quasi-stationäre Böe QSG ohne Zeitverzug der Anregung

Die Parameter der Gesamtfahrzeugparameter, der Reifenmodellierung sowie der aerodynamischen Kenngrößen zeigen auch bei der Wankreaktion einen relevanten Einfluss. Im Vergleich zu den bisher aufgezeigten Sensitivitäten der Gier- und Querbewegung sind bei der Wankreaktion zusätzliche SIs der Parameter des Feder- und Dämpfersystems als relevante Einflussfaktoren mit einem  $SI > 1/15$  dargestellt. Dabei sind die Steifigkeit der Tragfedern an Vorder- und Hinterachse und die Steifigkeit des Stabilisators der Vorderachse als Stellhebel aufgetragen.

Darüberhinaus ist eine noch deutlichere Streuung der Einflussgröße auf die Wankreaktion entsprechend der Größenordnung der aerodynamischen Anregung festzustellen. Die aufgezeigten SIs der Fahrzeuggesamtmasse und der Höhe des Schwerpunkts zeigen einen deutlich un-

terschiedlichen Einfluss auf die Wankreaktion des Fahrzeugs in Abhängigkeit des Niveaus der aerodynamischen Anregung. Diese Unterschiede lassen sich über die Zusammenhänge der Bewegungsgleichung des Wankfreiheitsgrades aus Gleichung 2.28 erläutern. Sowohl die Fahrzeugmasse als auch die Schwerpunkthöhe haben dabei einen relevanten und in Abhängigkeit der Größenordnung der hierbei zusammenspielenden Parameter zum Teil auch gegensätzlichen Einfluss auf die Fahrzeugreaktion. Die Fahrzeugmasse hat dabei sowohl auf die Gewichtskraft als auch auf die resultierende Zentripetalkraft der Bahnkurve Einfluss. Die Bahnkurve, und somit die Abweichung des Fahrzeugaufbaus von der Solltrajektorie, resultiert dabei aus der aerodynamischen Anregung. Entsprechend des Momentengleichgewichts um die Wankachse des Fahrzeugs resultiert eine unterschiedliche Einflussgröße einer Änderung der Parameter in Abhängigkeit der Größenordnung der aerodynamischen Störgröße.

Bei Betrachtung der SIs der Wankreaktion zeigt sich die Achslastverteilung auch hier als signifikante Kenngröße der Fahrzeugreaktion unter Seitenwind. In der Kategorie der Gesamtfahrzeugparameter zeigt sich im Vergleich zur Quer- und Gierbewegung ein höherer Einfluss der Spurweite. Die Parameter des Feder-/Dämpfersystems weisen einen geringen Einfluss auf die Fahrzeugantwort auf. Vergleicht man den Einfluss einer Änderung der Gesamtmasse mit dem einer Tragfedersteifigkeit, so zeigt sich ein 10-fach höherer Einfluss der Gesamtmasse.

Zusammenfassend können bei einer identischen, relativen Änderung von Fahrzeug- und Fahrwerksparameter die Parameter der Fahrzeuggene, der Parameter der Reifenmodellierung sowie der aerodynamischen Anregung als relevante Stellhebel zur Grundausslegung des Seitenwindverhaltens von Personenkraftwagen identifiziert werden. Die Änderungen der Parameter der Elasto-Kinematik und des Feder-Dämpfer-Systems haben dabei einen Einfluss deutlich geringerer Größenordnung. Nur wenige Parameter zeigen einen signifikanten Zielkonflikt bei ihrer Ausprägung zur Auslegung des Seitenwindverhaltens unterschiedlicher Anregungsniveaus. Zumeist führt eine Parameteränderung zu einer gleichzeitigen Verbesserung bzw. Verschlechterung der Fahrzeugreaktion bei Anregung durch die betrachteten Anregungsarten. Die aufgezeigten Parametereinflüsse sind hierbei die ermittelten SIs weiterer Manöver der Eigenschaftsfelder der Quer- und Vertikaldynamik nach [71] gegenüberzustellen. Daraus kann eine konfliktfreie Ausprägung der Grundausslegungsparameter gewährleistet werden.

### 6.2.2. Stellhebelanalyse mit Betrachtung einer Variationsbreite der Parameter

Im Folgenden wird zur Stellhebelanalyse des Störungsverhaltens, eine mögliche Variationsbreite der Fahrzeug- und Fahrwerksparameter in die Untersuchung miteinbezogen. Zur Ermittlung einer Variationsbreite wurden die Parameter von Fahrzeugen ähnlicher Fahrzeugklasse und -architektur betrachtet. Entsprechend der hierbei identifizierten Varianz der jeweiligen Parameter wird eine mögliche Variationsbreite nach Gleichung (6.8) ermittelt. Bei der graphischen Gegenüberstellung der Kenngrößen der VSIs sind die Skalenwerte der Achsen auf einen Wertebereich -1 und +1 normiert. Der Skalierungsfaktor für die Normierung ist bei allen Darstellungen der VSIs identisch. Für eine übersichtliche Darstellung der großen Anzahl betrachteter VSIs werden die Sensitivitätsindices der Variationsbreite  $VSI_k < 1/16$  aufgrund der zu vernachlässigenden Relevanz für die Fahrzeugreaktion nicht dargestellt. Abbildung 6.9 zeigt die auf die Variationsbreite bezogenen Sensitivitätsindices VSI des Fahrzeugs V3 der Mittelwer-

te über alle betrachteten, durch den Fahrer wahrnehmbaren CVs bei einer Anregung durch die Seitenwindanlage und durch eine generische, quasi-stationäre Böe.

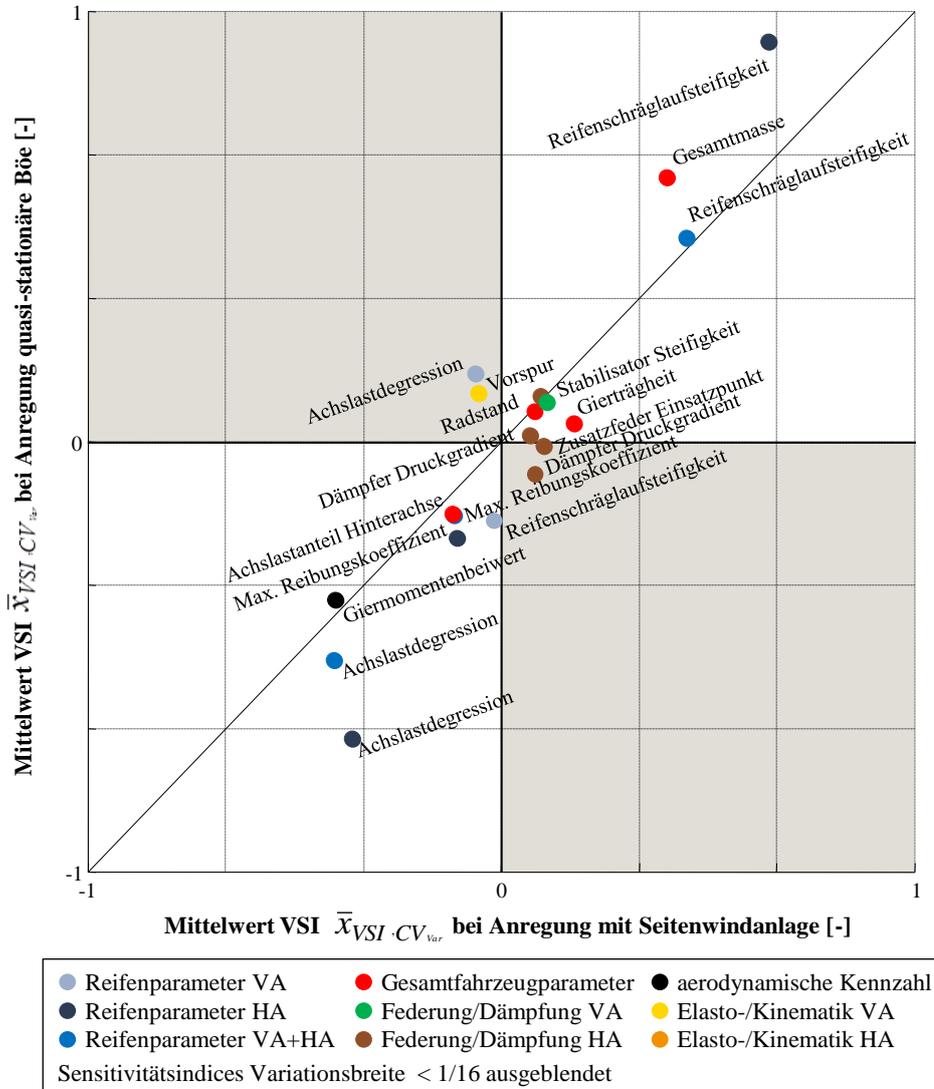


Abbildung 6.9.: Mittelung VSI  $\bar{x}_{VSI, CV_i}$  bei Anregung des Fahrzeugs V3 durch eine Seitenwindanlage sowie quasi-stationäre Böe QSG ohne Zeitverzug der Anregung

Betrachtet man die in Abbildung 6.9 dargestellten VSIs, so wird die Auswirkung der möglichen Variationsbreite der Fahrzeug- und Fahrwerksparemeter deutlich. Wird die Variationsbreite in die Stellhebelanalyse miteinbezogen, so ändert sich die Größenordnung der Einflussgröße deutlich. Als relevante Kenngrößen sind zusätzliche Parameter der Elasto-Kinematik an Vorder- und Hinterachse aufgetragen. Es handelt sich dabei hauptsächlich um Werte zur Beschreibung der Vorspurkennlinien an der Vorderachse. Die Werte der Elasto-Kinematik weisen auch hierbei im Vergleich zu den Fahrzeuggenen einen geringeren Einfluss auf. Jedoch zeigt sich ein größerer Einfluss auf die Fahrzeugreaktion bei Anregung durch die generische Seitenwindböe. Die Kenngrößen der Elasto-Kinematik weisen somit einen größeren Einfluss auf das Störungsverhalten

## 6. Einfluss des Fahrwerks auf die Fahrzeugreaktion

bei aerodynamischen Anregungen geringerer Größenordnung auf. Darüberhinaus ist die Einflussgröße und Reihenfolge der aufgetragenen SIs im Vergleich zur Darstellung in Abbildung 6.3 deutlich unterschiedlich. Als Beispiel sieht man, dass der Stellhebel des Fahrzeugparameters der Achslast an der Hinterachse aufgrund der real auftretenden, geringen Streubreite durch andere Auslegungskriterien von Fahrdynamik und -komfort limitiert ist.

Auch hier soll die Übertragbarkeit der gewonnenen Erkenntnisse auf andere Fahrzeug- und Fahrwerksarchitekturen am Beispiel der möglichen Variationsbreite der Parameter für ein Sports-Utility-Vehicle (SUV) überprüft werden. Folgende Darstellung 6.10 zeigt die auf die Variationsbreite bezogenen Sensitivitätsindices VSI des Fahrzeugs V7 der Mittelwerte über alle betrachteten CVs.

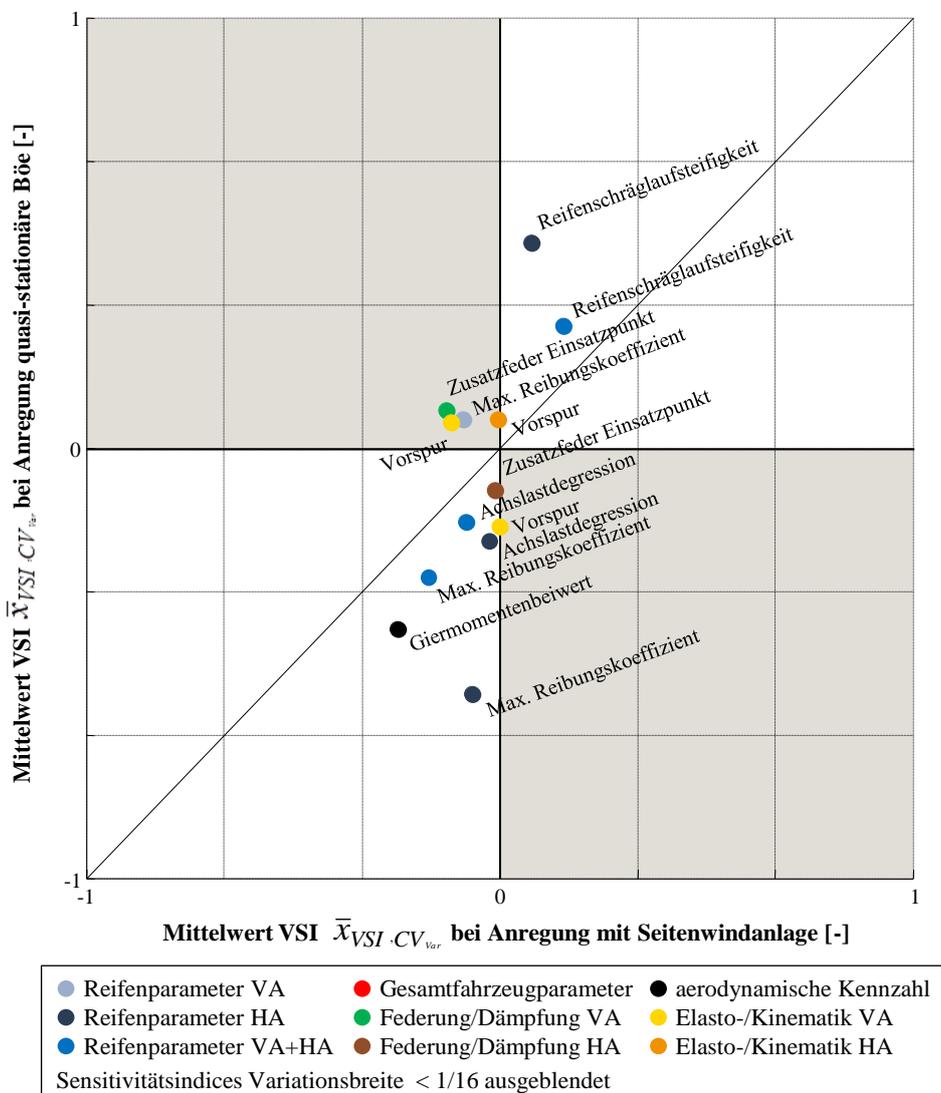


Abbildung 6.10.: Mittelung VSI  $\bar{x}_{VSI, CV_i}$  bei Anregung des Fahrzeugs V7 durch eine Seitenwindanlage sowie quasi-stationäre Böe QSG ohne Zeitverzug der Anregung des Fahrzeugs V7

Die in Abbildung 6.10 dargestellten VSIs des Geländefahrzeugs V7 weisen deutlich andere Kenngrößen im Vergleich zu den in Abbildung 6.4 dargestellten VSIs des Fahrzeuges der oberen Mittelklasse V3 auf. Auch hier zeigen sich, neben den Reifenparametern, Parametern der Elasto-Kinematik und des Feder-Dämpfersystems als Stellhebel zur Ausprägung des Störungsverhaltens des Personenkraftwagens. Auffällig in der Darstellung der VSIs des Fahrzeugs V7 ist jedoch die hierbei geringe Bewertung der Stellhebelgröße der Gesamtfahrzeugparameter. Dies ist in der geringen, tatsächlich auftretenden Streubreite der Gesamtfahrzeugparameter ähnlicher Fahrzeuge der Fahrzeugklasse begründet. Eine Übertragbarkeit der Ergebnisse der Stellhebelanalyse mit Betrachtung der möglichen Variationsbreiten der Fahrzeug- und Fahrwerksparameter auf andere, vor allem neuartige Fahrzeugarchitekturen, ist somit nicht gegeben. Zur Stellhebelanalyse der Grundauslegung des Störungsverhaltens von Personenkraftwagen ist somit der fahrzeugspezifische Auslegungsspielraum zu betrachten.

## 6.3. Einfluss ausgewählter Fahrwerksbauteile auf die Fahrzeugreaktion

Zusätzlich zu der im vorherigen Abschnitt ermittelten Einflussgröße singulärer Änderungen von Fahrzeug- und Fahrwerksparametern auf die Fahrzeugreaktion wird im Folgenden der Einfluss ausgewählter Fahrwerksbauteile genauer betrachtet. Ziel ist es dabei, den Einfluss einzelner Bauteile als Bestandteil der beschriebenen Fahrwerksparameter genauer zu betrachten bzw. durch die Variation kompletter Bauteile des Fahrwerks den Einfluss multi-variater Parameteränderungen zu untersuchen. Dadurch kann der Einfluss multivariater Parameteränderungen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Anregungsniveaus der aerodynamischen Störung untersucht werden. Aufgrund der hierbei erforderlichen Untersuchung des Einflusses einzelner Bauteileigenschaften, wird die Berechnung der Einflussgröße über die Abbildung des Gesamtfahrzeuges in einem MKS-Modell realisiert.

### 6.3.1. Gummi- und Hydrolager

Wie in Abbildung 6.9 dargestellt nimmt die Einflussgröße der Kenngrößen der Elasto-Kinematik unter Berücksichtigung der möglichen Streubreiten der Parameter zu. Der hierbei beschriebene, stärkere Einfluss zeigt sich besonders bei aerodynamischen Störungen geringer, durchschnittlicher Anregungsgröße. Für die Ausprägung der Elasto-Kinematik der Achsen des Fahrwerks sind Gummi- bzw. Hydrolager relevante Bauteile der Fahrwerksarchitekturen. Im Folgenden wird die Einflussgröße der Lager auf die Fahrzeugreaktion bei kleinen aerodynamischen Anregungen untersucht.

Gummi- und Hydrolager werden als Verbindungselemente einzelner Fahrwerksbauteile, wie Lenker oder Radträger, sowie als Elemente zur Schwingungsentkopplung zwischen Karosserie und Fahrwerk an diversen Stellen im Fahrzeug verbaut. Die Lager weisen entsprechend der jeweiligen Bauart und Dimensionierung unterschiedliche Kennlinien des Steifigkeits- sowie Dämpfungsverhaltens in Abhängigkeit der anliegenden Lasten auf. In folgender Abbildung 6.11 sind die Fahrwerkselemente sowie Gummi- und Hydrolager der Vorderachse des betrachteten Fahrzeuges aufgezeigt.

## 6. Einfluss des Fahrwerks auf die Fahrzeugreaktion

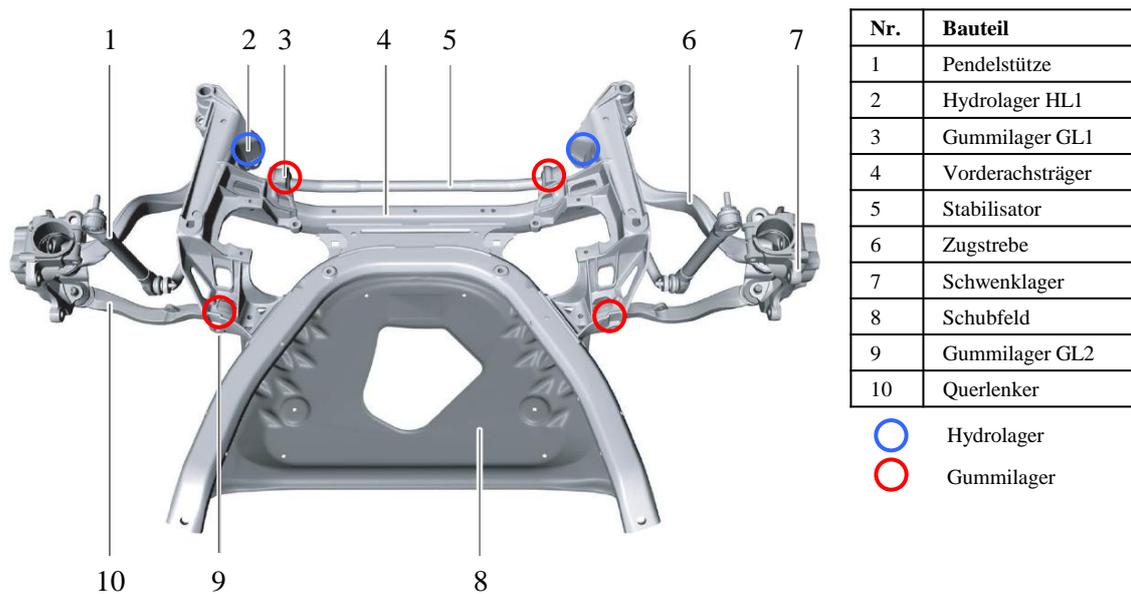


Abbildung 6.11.: Übersicht der Fahrwerkselemente der Vorderachse des betrachteten Fahrzeuges

Zudem sind in Abbildung 6.12 die Fahrwerkselemente sowie die Gummilager der Hinterachse des betrachteten Fahrzeuges abgebildet.

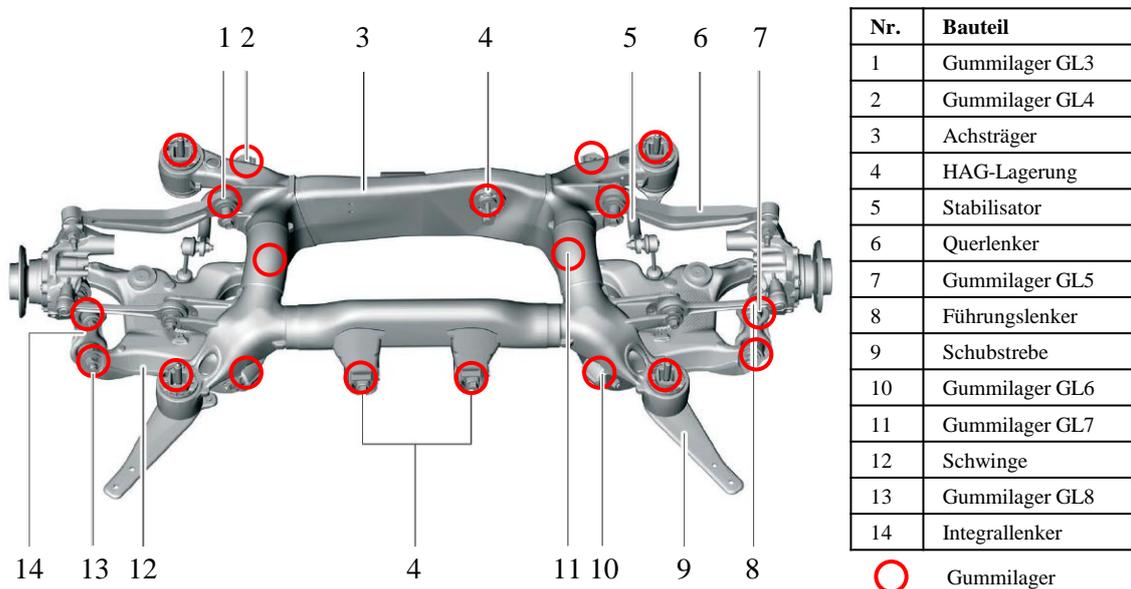


Abbildung 6.12.: Übersicht der Fahrwerkselemente der Hinterachse des betrachteten Fahrzeuges

Für eine Analyse des Einflusses der Gummi- und Hydrolager auf die Fahrzeugreaktion unter Seitenwind werden das Hydrolager HL1 sowie die Gummilager GL1 bis GL8 im MKS-Modell variiert. Dazu wird die translatorische Steifigkeit der Bauteile in allen drei Freiheitsgraden um 10% erhöht. Die Änderung der Bauteile erfolgt dabei jeweils simultan auf der linken und rech-

ten Seite des Fahrzeuges. Zur Vergleichbarkeit der hierbei ermittelten Einflussgröße wird der Sensitivitätsindex  $SI$  auf Basis einer Änderung  $\epsilon = 10\%$  bestimmt. Die hierbei ermittelten  $SI$ s sind auf den gleichen Wert wie in Abschnitt 6.2 normiert. Das Störungsverhalten des Fahrzeuges wird simulativ durch die Anregung mit der generischen, quasi-stationären Seitenwindböe mit einem durchschnittlichen Anregungsniveau real auftretender Seitenwindstörung bestimmt. Die folgenden Ergebnisse wurden beispielhaft mit der simulativen Abbildung des Fahrzeuges V3 bestimmt. In folgender Abbildung 6.13 sind die ermittelten  $SI$ s für den Einfluss einer Erhöhung der translatorischen Steifigkeit der betrachteten Gummi- und Hydrolager in einem Balkendiagramm aufgetragen.

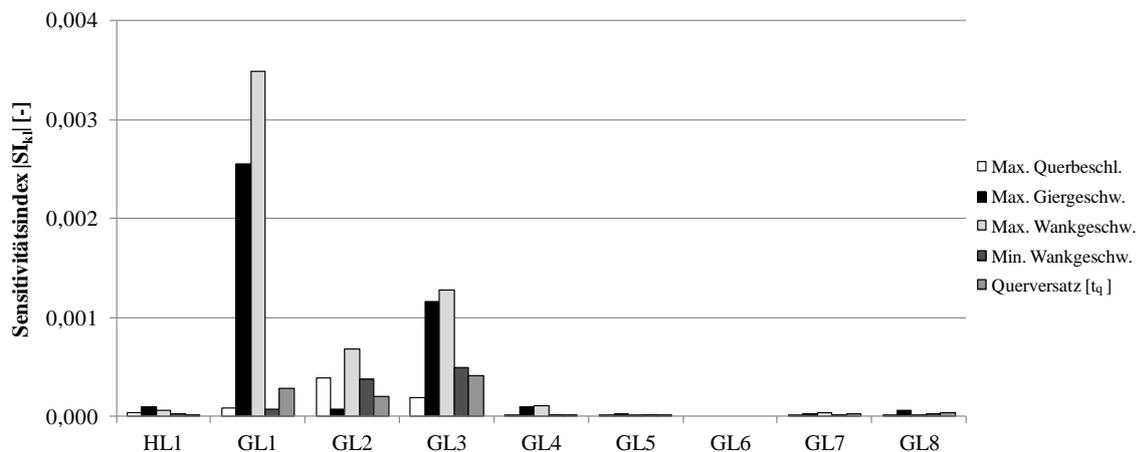


Abbildung 6.13.:  $SI$ s für eine Änderung der translatorischen Steifigkeit des Hydrolagers HL1 und der Gummilager GL1-8

Als maximaler Wert eines  $SI$ s lässt sich im Rahmen der Untersuchung der Einfluss der Steifigkeitsänderung des Gummilagers GL1 an der Anbindung des Stabilisators zum Achsträger der Vorderachse feststellen. Der  $SI$  hat dabei einen Wert von  $SI = 0.0035$  für die Bewegungsgröße der maximalen Wankgeschwindigkeit. Vergleicht man die hier aufgeführten Werte der Sensitivitätsindices einer 10%-Änderung der Lagersteifigkeiten mit den  $SI$ s der Abbildung 6.3, so wird der geringe Einfluss der Lagersteifigkeit deutlich. Die hierbei festgestellte Einflussgröße macht die Notwendigkeit der Grundauslegung der Gesamtfahrzeugparameter zur Ausprägung des Störungsverhaltens von Personenkraftwagen unter Seitenwind deutlich.

### 6.3.2. Einfluss des Fahrzeugreifens

Als weiteres Bauteil des Fahrwerks wird im Folgenden der Einfluss des Fahrzeugreifens auf das Störungsverhalten von Personenkraftwagen untersucht. In Ergänzung zu dem in Abschnitt 6.2 aufgezeigten Einfluss einzelner Parameteränderungen der Reifenmodellierung wird hierbei der Einfluss einer kombinierten Parameteränderung betrachtet. Dazu wird die Einflussgröße des Reifentyps beziehungsweise des Reifenherstellers auf das Störungsverhalten von Personenkraftwagen unter Seitenwindanregung untersucht. Durch eine Variation des Reifens werden die Fahrzeugmasse, die ungefederten Massen, die Trägheitsmomente der Räder sowie die gesamten Kennlinien der MF-Modellierung simultan abgeändert. Zur Vergleichbarkeit der Einflussgröße werden im Folgenden die Untersuchungsergebnisse des Reifeneinflusses mit Reifen der gleichen

## 6. Einfluss des Fahrwerks auf die Fahrzeugreaktion

Dimensionierung aufgeführt. Reifentypen identischer Dimension, Art und Notlaufeigenschaft unterscheiden sich dabei durch das Fabrikat des Reifenherstellers und somit bezüglich der Materialausprägung des Reifens.

Bei der Variation des Reifentyps wird die Schräglaufsteifigkeit der Reifen an Vorder- und Hinterachse bei stationärer Radlast aus Fahrzeuggewicht und Achslastverteilung von V3 als exemplarischer Kennwert der Parametrierung des Reifenmodells aufgeführt. Die Auflistung der Schräglaufsteifigkeit erfolgt als referenzierter Wert  $C_{\alpha i}$  nach 6.10. Als Referenz dient dabei der Reifen R1.

$$C_{\alpha i} = \frac{c_{\alpha i,r}}{c_{\alpha i,ref}} \quad (6.10)$$

Der Reifenfülldruck wurde bei den betrachteten Reifentypen an Vorder- und Hinterachse entsprechend des Solldrucks für eine Teilbelastung des Fahrzeuges vorgegeben. Neben der Variation des Reifentyps wurde zudem über eine Anpassung der Kennlinien der Reifenmodellierung der Einfluss des Reifenfülldrucks untersucht. Zunächst wird der Einfluss des Reifenfabrikats betrachtet. Dazu sind in Tabelle 6.1 die für die simulative Untersuchung des Einflusses des Reifens genutzten Reifentypen beschrieben.

Nr.	Reifendimension	Reifenart	Notlaufeigenschaft	$C_{\alpha v}$	$C_{\alpha h}$
R1	225/50 R17	Sommer	Standard	1.00	1.00
R2	225/50 R17	Sommer	Runflat-Reifen	0.78	0.83
R3	225/50 R17	Sommer	Runflat-Reifen	0.92	0.74
R4	225/50 R17	M+S-Reifen	Standard	0.78	0.81
R5	225/50 R17	M+S-Reifen	Runflat-Reifen	0.82	0.78

Tabelle 6.1.: Auflistung der Reifentypen zur Untersuchung des Einflusses des Reifens auf das Störungsverhalten

Aus den hier aufgeführten referenzierten Schräglaufsteifigkeiten wird deutlich, dass eine Reihung der Größenordnung der Schräglaufsteifigkeiten bezüglich den Reifenarten Sommer- und Winterreifen (M+S-Reifen) beziehungsweise über die Ausprägung der Reifen als Runflat-Reifen zur Verbesserung der Notlaufeigenschaften, nicht zwangsläufig ist. Ein Winterreifen kann teilweise höhere Schräglaufsteifigkeiten im Vergleich zum Sommerreifen eines anderen Reifenherstellers aufweisen.

In Darstellung 6.14 ist die Fahrzeugantwort bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage entsprechend der Variation des Reifentyps nach Tabelle 6.1 aufgeführt. Die Fahrzeugantwort wird dabei durch referenzierte Kennwerte VRCs der Bewegungsgrößen dargestellt. Als Referenz dient dabei die Fahrzeugantwort mit der Bereifung R1 des untersuchten Fahrzeugs.

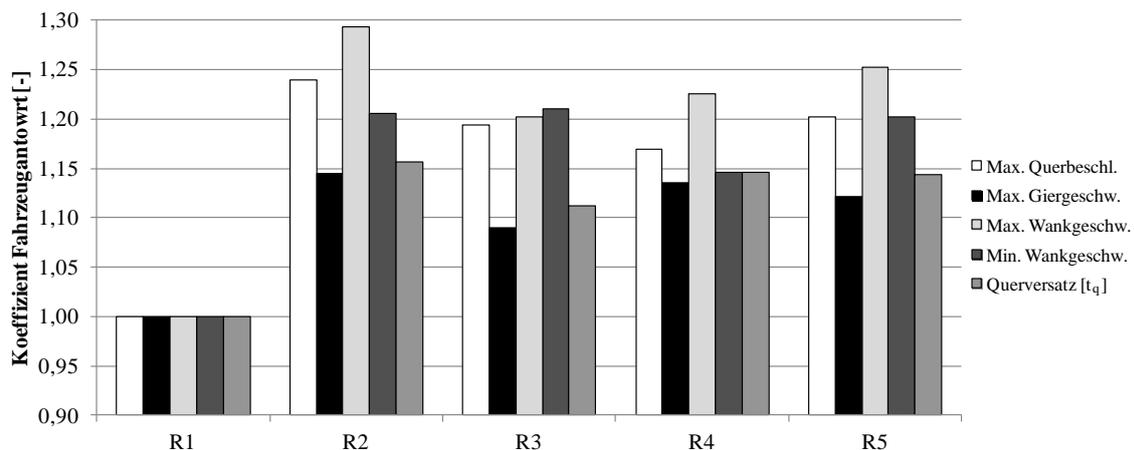


Abbildung 6.14.: Einfluss des Reifentyps auf die Fahrzeugreaktion bei Anregung durch eine Seitenwindanlage

Betrachtet man die hierbei aufgeführten Kenngrößen der Fahrzeugantwort, so wird der Einfluss des Reifens auf die Fahrzeugantwort bei aerodynamischer Anregung deutlich. Das Wechseln der Reifen kann trotz der identischen Reifendimensionen zu einer 24% höheren maximalen Querbeschleunigung, einer 14% höheren Giergeschwindigkeit und einer 29% höheren Wankgeschwindigkeit führen. Die Querabweichung des Fahrzeugs nimmt dabei um 16% zu. Bei Betrachtung der hier aufgezeigten Kenngrößen der Fahrzeugantwort mit den Reifen R1-R5 wird die Streuung der Einflussgröße der Reifen deutlich. Eine Reihung der Einflussgröße auf die Kenngrößen der Fahrzeugreaktion entsprechend der in Tabelle 6.1 aufgeführten Schräglaufsteifigkeiten lässt sich nicht ableiten. In Abbildung 6.15 ist die Fahrzeugantwort bei einer Anregung durch die generische Seitenwindböe ohne VZW des Anströmwinkels entsprechend der Variation des Reifentyps dargestellt. Auch hier ist die Fahrzeugantwort auf die Fahrzeugreaktion bei einer Bereifung mit Reifentyp R1 des Fahrzeuges referenziert.

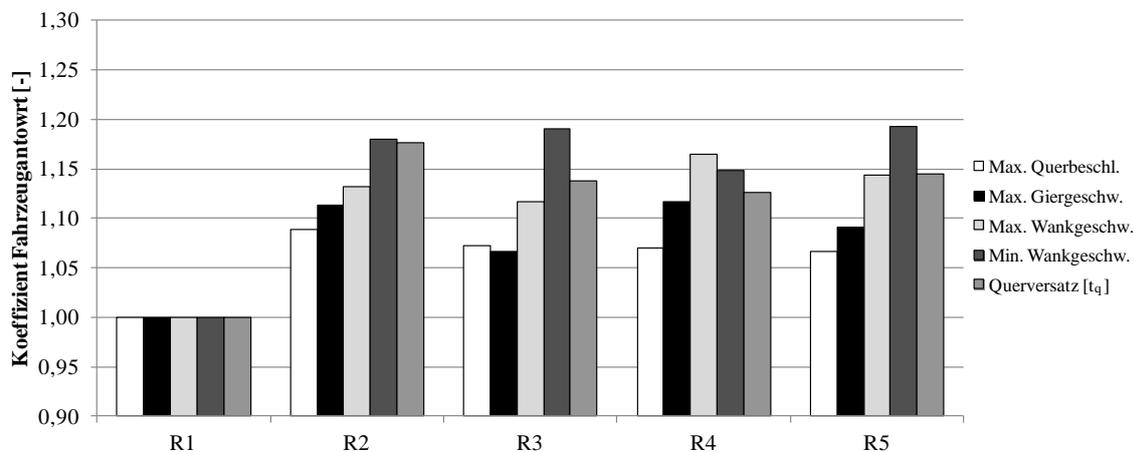


Abbildung 6.15.: Einfluss des Reifentyps auf die Fahrzeugreaktion bei Anregung durch eine generische Seitenwindböe ohne VZW

## 6. Einfluss des Fahrwerks auf die Fahrzeugreaktion

Die Fahrzeugreaktion bei Anregung durch die quasi-stationäre Seitenwindböe variiert um bis zu 20% im Vergleich zur Fahrzeugantwort mit der Bereifung R1. Vergleicht man die hier aufgezeigten Einflüsse des Reifentyps auf die Fahrzeugreaktion mit den Kenngrößen der VRCs in Abbildung 6.14 so wird der unterschiedliche Einfluss in Abhängigkeit des Niveaus der aerodynamischen Anregung deutlich. Auch hierbei lässt sich keine generische Aussage zur Einflussgröße ableiten. Abbildung 6.16 zeigt die referenzierte Fahrzeugantwort in Abhängigkeit der Variation des Reifentyps bei einer Anregung durch die generische Seitenwindböe mit Vorzeichenwechsel.

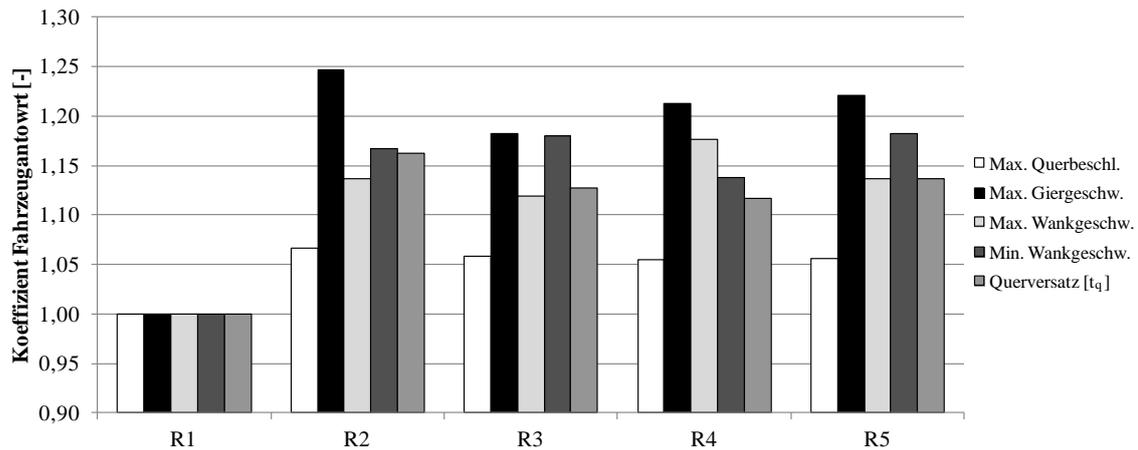


Abbildung 6.16.: Einfluss des Reifentyps auf die Fahrzeugreaktion bei Anregung durch eine generische Seitenwindböe mit VZW

Die hierbei aufgezeigte Fahrzeugantwort variiert am Beispiel der maximalen Giergeschwindigkeit um bis zu 25% entsprechend des Reifentyps. Auch hier zeigt der Wechsel der Reifen eine deutliche Abweichung der Einflussgröße auf die Fahrzeugreaktion im Vergleich zu den bisher betrachteten aerodynamischen Anregungen. Die unterschiedliche Einflussgröße macht die Schwierigkeit der Bewertung der Einflussgröße multi-variater Parameteränderungen auf das Störungsverhalten von Personenkraftwagen deutlich. Die hierbei aufgezeigten Einflussgrößen sind deutlich von der Art der Anregung abhängig. Zudem ist eine Quantifizierung der Einflussgröße multi-variater Parameteränderungen nur bedingt möglich. Aufgrund der nicht-linearen Zusammenhänge der Fahrzeugreaktion der Wankbewegung ist der Einfluss multi-variater Parameteränderungen auf die Fahrzeugreaktion nicht über Superposition der Einflussgröße einzelner Parameteränderungen möglich.

Neben dem Einfluss des Reifenfabrikats wird im Folgenden der Einfluss des Reifenfülldrucks untersucht. Über einen Algorithmus werden die Kennlinien des Reifenmodells R1 auf unterschiedliche Fülldrücke angepasst. Der Reifenfülldruck wird dabei zwischen  $p_{R,i} = 2.0bar$  und  $p_{R,i} = 3.4bar$  am Fahrzeug V3 vorgegeben. Zunächst wird die Fahrzeugreaktion bei Anregung durch eine Seitenwindanlage betrachtet. Die hier aufgezeigten Werte der Fahrzeugreaktion sind dabei auf die Fahrzeugantwort mit einem Reifendruck von 2.7bar an allen Reifen bezogen. In Darstellung 6.17 ist die Fahrzeugreaktion der VRCs der maximalen Giergeschwindigkeit in Abhängigkeit des Reifenfülldrucks dargestellt.

Hierbei sind zudem in Punkt A die Solldrücke bei Teilbeladung und in Punkt B die Solldrücke bei Vollbeladung aufgetragen. Die aufgezeigten VRCs der maximalen Giergeschwindigkeit

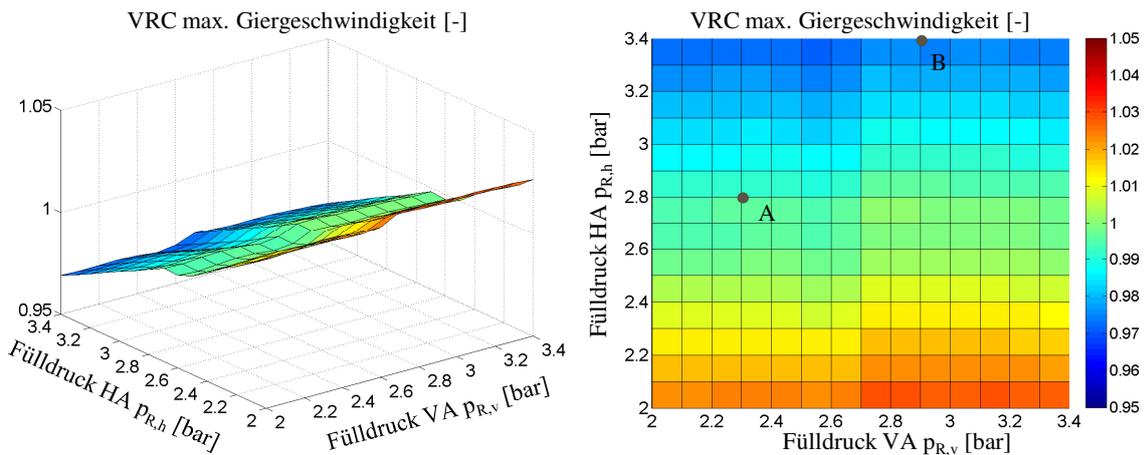


Abbildung 6.17.: Einfluss des Reifenfülldrucks an Vorder- und Hinterachse auf  $max(\psi)$  bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage mit  $v_{fzg} = 140 km/h$

keit zeigen eine Erhöhung der Fahrzeugreaktion bei Verringerung des Reifenfülldrucks an der Hinterachse. Vor allem bei gleichzeitiger Erhöhung des Reifendrucks an der Vorderachse ist eine Erhöhung der Fahrzeugreaktion festzustellen. Die ermittelte Einflussgröße des Reifendrucks mit einem maximalen  $VRC = 1.03$  für den untersuchten Bereich der Reifenfülldrücke fällt bei Gegenüberstellung der Einflussgröße des Reifentyps vergleichsweise gering aus. Im Vergleich zur Einflussgröße einer Änderung der Elasto-Kinematik ist die Fülldruckänderung jedoch als relevanter Einflussparameter zur Beeinflussung des Seitenwindverhaltens von Personenkraftwagen festzuhalten. Dieser Einfluss ist hauptsächlich durch die Auswirkungen der simulierten Reifendruckerhöhung auf die Schräglaufsteifigkeit des Reifens begründet. Abbildung 6.18 zeigt den Querversatz bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage in Abhängigkeit des Reifenfülldrucks.

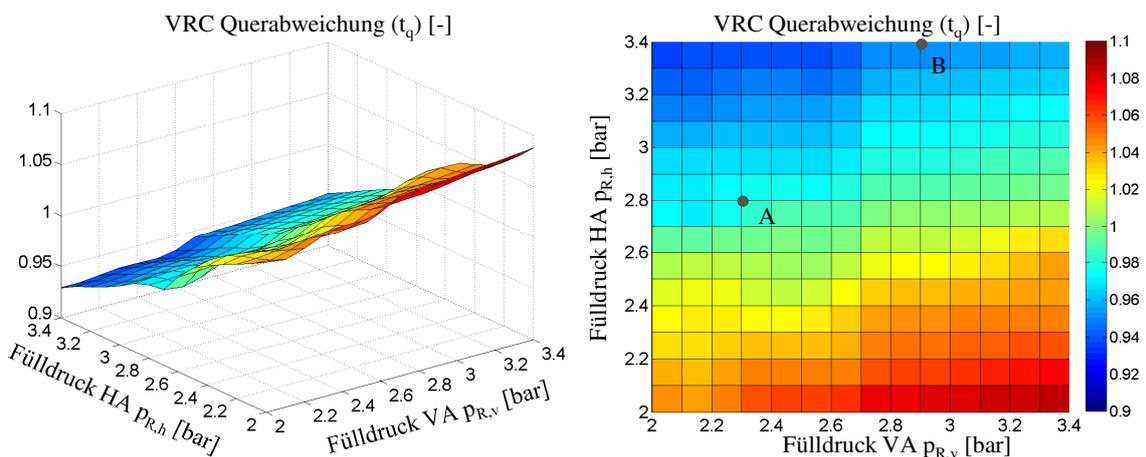


Abbildung 6.18.: Einfluss des Reifenfülldrucks an Vorder- und Hinterachse auf den Querversatz bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage mit  $v_{fzg} = 140 km/h$

Der Einfluss des Reifenfülldrucks auf die Fahrzeugreaktion wird durch die Auswirkungen auf den Querversatz deutlich. Eine Verringerung des Reifenfülldrucks an der Hinterachse bei gleichzeitiger Erhöhung an der Vorderachse führt auch hier zur größten Erhöhung der Fahrzeugant-

## 6. Einfluss des Fahrwerks auf die Fahrzeugreaktion

wort. Dabei kann durch den maximalen  $VRC = 1.09$  eine Erhöhung um 9% in dem untersuchten Bereich der Reifenfülldrücke festgestellt werden. Zur Untersuchung der Abhängigkeit der Einflussgröße von der Art der aerodynamischen Anregung werden im Folgenden die Auswirkungen auf die Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage dem Einfluss bei Anregung durch die generische Seitenwindböe gegenübergestellt. Abbildung 6.19 zeigt die Auswirkungen einer Änderung des Reifenfülldrucks auf die maximale Giergeschwindigkeit einer Seitenwindanlage (a), einer generischen, quasi-stationären Seitenwindböe ohne (b) und mit Vorzeichenwechsel (c).

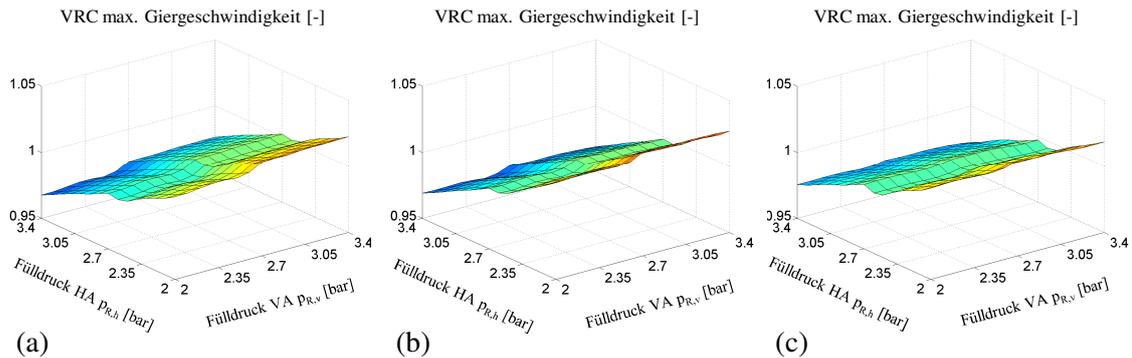


Abbildung 6.19.: Einfluss des Reifenfülldrucks auf  $\max(\psi)$  bei Anregung Seitenwindanlage (a), quasi-stationäre Seitenwindböe ohne (b) und mit Vorzeichenwechsel (c)

Bei Vergleich der Simulationsergebnisse lässt sich ein ähnlicher Einfluss auf die Fahrzeugreaktion bei geringer Anregungsamplitude feststellen. Darüberhinaus sind in Abbildung 6.20 die Auswirkungen einer Reifenfülldruckänderung auf die Querabweichung des Fahrzeuges für die betrachteten aerodynamischen Anregung aufgetragen.

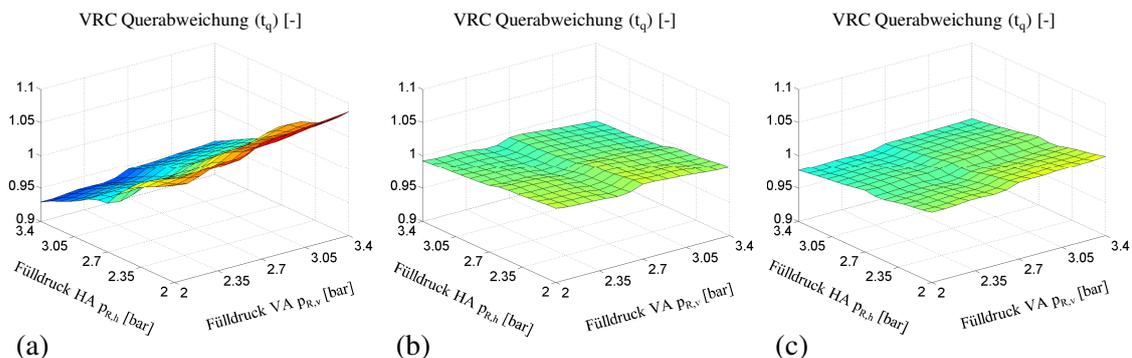


Abbildung 6.20.: Einfluss des Reifenfülldrucks auf  $p_y(t_q)$  bei Anregung Seitenwindanlage (a), quasi-stationäre Seitenwindböe ohne (b) und mit Vorzeichenwechsel (c)

Es zeigt sich, dass die Auswirkungen einer Reifenfülldruckänderung auf die in der Simulation bestimmte Fahrzeugreaktion bei kleineren, aerodynamischen Anregungen deutlich geringer ausfallen. Im Vergleich zur Fahrzeugreaktion führt eine Änderung des Fülldrucks nur zu geringfügigen Änderungen der Querabweichung. Im analysierten Bereich des Reifendrucks ist ein maximaler  $VRC = 1.015$  bzw.  $VRC = 1.020$  für die Anregungen der generischen Seitenwindböe festzustellen.

Die hier beschriebenen Untersuchungsergebnisse zur Einflussgröße ausgewählter Bauteile machen die Bandbreite der Stellhebelgrößen deutlich. Einzelne Bauteile der Elasto-Kinematik wie Gummilager zeigen im niedrigen Frequenzbereich der aerodynamischen Anregung nur geringen Einfluss. Betrachtet man den Einfluss des Reifens, so bestätigt sich hierbei der umfangreiche Einfluss der Parametrierung des Reifenmodells aus Abschnitt 6.2. Zudem konnte der aus dem Fahrversuch bekannte Einfluss des Reifendrucks auf die Fahrzeugantwort als relevante Größe für den Querversatz unter Seitenwind simulativ bestätigt werden.



## 7. Objektivierung der subjektiven Fahrerwahrnehmung

Nach der Quantifizierung der Einflussgröße des Fahrwerks auf das Übertragungsverhalten aerodynamischer Anregungen von Personenkraftwagen wird im Folgenden die subjektive Wahrnehmung der Fahrzeugreaktion durch den Fahrer betrachtet. Um einen zielgerichteten Grundauslegungsprozess des instationären Seitenwindverhaltens im Rahmen der Fahrwerksauslegung zu realisieren gilt es, die signifikanten Kenngrößen der subjektiven Wahrnehmung des Fahrzeugverhaltens unter Seitenwind zu identifizieren. Die in Abschnitt 5 beschriebene nicht-lineare Abhängigkeit der Wankgeschwindigkeit des Fahrzeugaufbaus von Charakteristika der aerodynamischen Anregung macht die Notwendigkeit der Analyse objektiver Kenngrößen für den Grundauslegungsprozess deutlich. Die genaue Kenntnis objektiver Kenngrößen der subjektiven Wahrnehmung der Fahrzeugreaktion ist hierbei notwendig, um das Antwortverhalten von Personenkraftwagen unter Seitenwindanregung zu optimieren.

Wie in Abschnitt 2.2.1 aufgezeigt, sind die real auftretenden, aerodynamischen Windgeschwindigkeiten natürlichen Seitenwinds in der Regel deutlich geringer als die Geschwindigkeiten der Anströmung einer Versuchsdurchführung durch eine Seitenwindanlage. Im Rahmen der folgenden Untersuchung wird deshalb die subjektive Wahrnehmung der Fahrzeugreaktion durch transiente, quasi-stationäre beziehungsweise instationäre, aerodynamische Seitenwindböen nach Abschnitt 3 analysiert. Dabei gilt es, die subjektive Wahrnehmung der mehrdimensionalen Fahrzeugantwort auf Seitenwindböen zu untersuchen. Die Fahrzeugantwort kann dabei, wie in Kapitel 3 beschrieben, hinsichtlich der Amplitudenzusammensetzung der Anregungsgrößen einzelner Freiheitsgrade sowie der zeitlichen Zusammensetzung der Anregungssignale variieren.

Neben den durch CVs charakterisierte Amplitudenwerte der Fahrzeugbewegung ist die zeitliche Zusammensetzung der Fahrzeugreaktion zu beschreiben. Dabei werden die Zeitdauern zwischen dem Auftreten der Peakwerte unterschiedlicher Bewegungsgrößen als charakteristische Werte des zeitlichen Aufbaus bestimmt. Gleichung (7.1) zeigt beispielhaft die Berechnung des Zeitverzugs zwischen der maximalen Giergeschwindigkeit und der maximalen Wankgeschwindigkeit einer Fahrzeugreaktion.

$$\Delta t_{\psi-\dot{\varphi}} = t(\max(\dot{\varphi})) - t(\max(\dot{\psi})) \quad (7.1)$$

Wie in Abschnitt 2.5.2 erläutert, kann die Einflussgröße multi-dimensionaler mechanischer Schwingungen auf die subjektive Wahrnehmung des Menschen entsprechend eines dokumentierten Standards abgeleitet werden [75]. Aus den hier aufgezeigten Ergebnissen lässt sich eine Hierarchie der Einflussgröße kontinuierlicher Schwingungen oder stoßartiger Anregungen der einzelnen Freiheitsgrade nach Tabelle 2.8 ableiten. Bei den betrachteten transienten, quasi-stationären, bzw. instationären Seitenwindböen handelt es sich um kurzzeitig auftretende An-

regungen, die teilweise zu stoßartigen Fahrzeugreaktionen führen. Die Amplitudenwerte der Fahrzeugreaktion befinden sich dabei jedoch im Bereich der Wahrnehmungsschwellen des Menschen. Somit gilt es, die subjektive Wahrnehmung kurzzeitig auftretender, kleiner Störungen der Fahrzeugbewegung durch aerodynamische Anregungen genauer zu betrachten.

### 7.1. Beschreibung des Versuchsaufbaus

Um die subjektive Wahrnehmung der Fahrzeugantwort unter reproduzierbaren Randbedingungen bewerten zu können, werden Versuche in einem dynamischen Fahrsimulator durchgeführt [63]. Durch den realisierten Versuchsaufbau im Fahrsimulator kann eine Untersuchung der visuellen, vestibulären und propriozeptiven Wahrnehmung der Fahrzeugbewegung realisiert werden. Die Versuche sind dabei als Open-Loop Manöver ausgeführt, so dass die taktile Rückmeldung über das Lenkgefühl die subjektive Wahrnehmung des Störungsverhaltens im Fahrsimulator nicht beeinträchtigt. Dabei erfolgt keine Vorgabe von Geräuschen der Seitenwindanregung, so dass der Einfluss akustischer Signale auf die subjektive Wahrnehmung der Fahrzeugreaktion im Rahmen der vorliegenden Untersuchung nicht bewertet wird. Die Probanden befinden sich zur Bewertung der Fahrzeugreaktion auf der Fahrerposition eines realen Fahrzeugaufbaus im Fahrsimulator. Die folgende Abbildung 7.1 zeigt den für die Untersuchungen genutzten dynamischen Fahrsimulator.



Abbildung 7.1.: Abbildung des dynamischen Fahrsimulators zur Objektivierung der Bewertung des Störungsverhaltens

Zur Umsetzung eines Versuchsprogramms wurden Fahrzeugreaktionen bei Störung durch aerodynamische Anregungen im MKS-Modell aus Abschnitt 4.3 berechnet. Dabei wird die Fahrzeugreaktion auf generische, instationäre Seitenwindanregungen simuliert. Die berechneten Bewegungsgrößen der Fahrzeuge dienen als Vorgabewerte für die Ansteuerung des dynamischen Fahrsimulators. Auf der Projektionsfläche des Simulators wird als Fahrtszenario die Geradeausfahrt auf der mittleren Spur einer dreispurigen Autobahn dargestellt.

## 7.2. Durchführung einer Probandenstudie

Zum Abgleich der subjektiven Wahrnehmung des Fahrers mit Eigenschaften der Fahrzeugreaktion bei Anregung durch die generische Böe wurde eine Probandenstudie im Simulator durchgeführt. Um eine möglichst präzise Bewertung im Rahmen der Probandenstudie zu realisieren, wurde die Dauer eines Durchgangs der Simulatorstudie für die einzelnen Probanden limitiert. Deshalb erfolgt die Bewertung der Manöver innerhalb von zwei getrennten Durchgängen der Versuchsreihen. An der ersten Versuchsreihe nahmen 22 Probanden und an der zweiten Versuchsreihe 25 Probanden teil. Der Teilnehmerkreis umfasst teilweise Experten der fahrdynamischen Applikation und des Fahrversuchs. Die Probanden weisen dabei ein Alter zwischen 23 und 60 Jahren auf und sind größtenteils männlich. Fahrzeugart der modellierten Fahrzeugreaktion, beziehungsweise Kenngrößen der Fahrzeugbewegung sind den Probanden im Rahmen der Studie nicht bekannt.

### 7.2.1. Versuchsreihen und Manövervorgaben

Um die Spurhaltung des simulierten Fahrzeuges ohne Lenkkorrekturen zu realisieren, wird der Anströmwinkel der transienten aerodynamischen Böe von einem konstanten Anströmwinkel  $\tau = -3^\circ$  mit einer Amplitude von  $\Delta\tau = 6^\circ$  in beide Anströmrichtungen variiert. Die generische Seitenwindanregung wird dabei innerhalb eines Manövers des Fahrstudienversuchs als eine Reihe von zehn Einzelböen dargestellt. Abbildung 7.2 zeigt den Zeitverlauf der aerodynamischen Anströmung der Böenfolge für die Versuchsreihe im dynamischen Fahrstudienversuch.

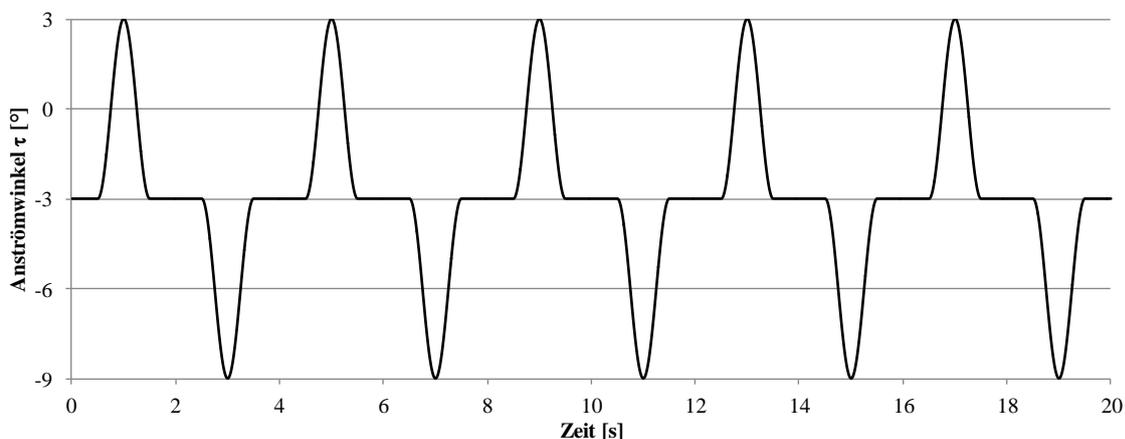


Abbildung 7.2.: Zeitverlauf des aerodynamischen Anströmwinkels der simulierten Seitenwindböen im Fahrstudienversuch

Über im Windkanal ermittelte stationäre Kennfelder der aerodynamischen Beiwerte werden die Kräfte und Momente der quasi-stationären, transienten Böenfolge ermittelt. Die berechneten quasi-stationären Böenfolgen werden entsprechend instationärer Charakteristika variiert. Die charakteristischen Kenngrößen zur Realisierung der generischer, instationärer Seitenwindböen wurden dabei aus Ergebnissen von CFD-Berechnungen nach [160] abgeleitet.

## 7. Objektivierung der subjektiven Fahrerwahrnehmung

Im ersten Teil der Studie werden einzelne Kenngrößen der Fahrzeugreaktion des Fahrzeuges V1 deutlich überzeichnet. Dazu werden die Amplituden und Zeitverzüge der Bewegungsgrößen  $a_y$ ,  $\dot{\varphi}$  und  $\dot{\psi}$  variiert. Die Werte der Amplituden sind deutlich oberhalb der vestibulären und visuellen Wahrnehmungsschwelle. Auch die Variation der Zeitverzüge der Bewegungsgrößen erfolgt oberhalb des in Abschnitt 2.5.1 beschriebenen Auflösungsvermögens des Fahrers. Um die zeitliche Zusammensetzung der Fahrzeugbewegung zu charakterisieren, werden die Zeitverzüge  $\Delta t_{\dot{\psi}-a_y}$  zwischen den Peakwerten der maximalen Giergeschwindigkeit und der maximalen Querbeschleunigung nach Gleichung (7.2), sowie die Zeitverzüge  $\Delta t_{a_y-\dot{\varphi}}$  der maximalen Querbeschleunigung und der minimalen Wankgeschwindigkeit nach Gleichung (7.3) aufgeführt.

$$\Delta t_{\dot{\psi}-a_y} = t(\max(a_y)) - t(\max(\dot{\psi})) \quad (7.2)$$

$$\Delta t_{a_y-\dot{\varphi}} = t(\min(\dot{\varphi})) - t(\max(a_y)) \quad (7.3)$$

Die folgende Abbildung 7.3 zeigt die VRCs der Manöver V1a-f mit einer Änderung der Amplitudenwerte der Fahrzeugreaktion bezogen auf Fahrzeug V1. In Abbildung 7.4 sind zudem die VRCs der Manöver V1g-j mit einer Änderung der zeitlichen Zusammensetzung der Fahrzeugreaktion bezogen auf Fahrzeug V1 aufgetragen.

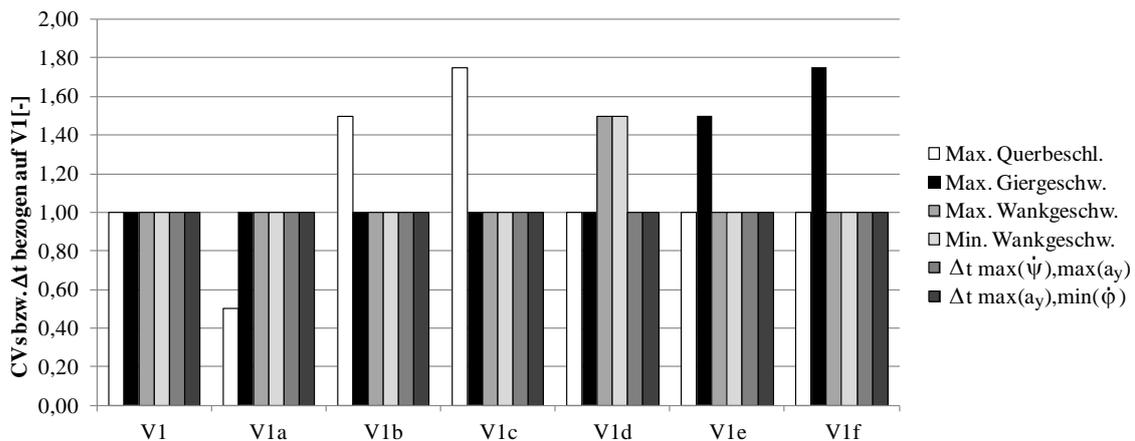


Abbildung 7.3.: Manörovorgaben V1a-f einer Überzeichnung einzelner Amplitudenwerte der Fahrzeugreaktion bezogen auf V1

Durch Vorgabe der hier charakterisierten Fahrzeugreaktionen lässt sich im ersten Durchgang der Probandenstudie ein Versuchsprogramm mit  $n = 12$  Manövern im dynamischen Fahrsimulator realisieren.

Im zweiten Durchgang der Studie bewerten die Probanden die Fahrzeugreaktion bei kombinierten Variationen der Querbeschleunigung, der Giergeschwindigkeit und Wankgeschwindigkeit. Die berechneten Amplituden der Bewegungsgrößen der einzelnen Manöver liegen dabei im Bereich der in Tabelle 2.5 beschriebenen Wahrnehmungsschwellen. Maximal- und teilweise die Minimalwerte der betrachteten Bewegungsgrößen liegen jedoch leicht oberhalb der beschriebenen Schwellen. Um die zeitliche Zusammensetzung der Fahrzeugbewegung zu charakterisieren,

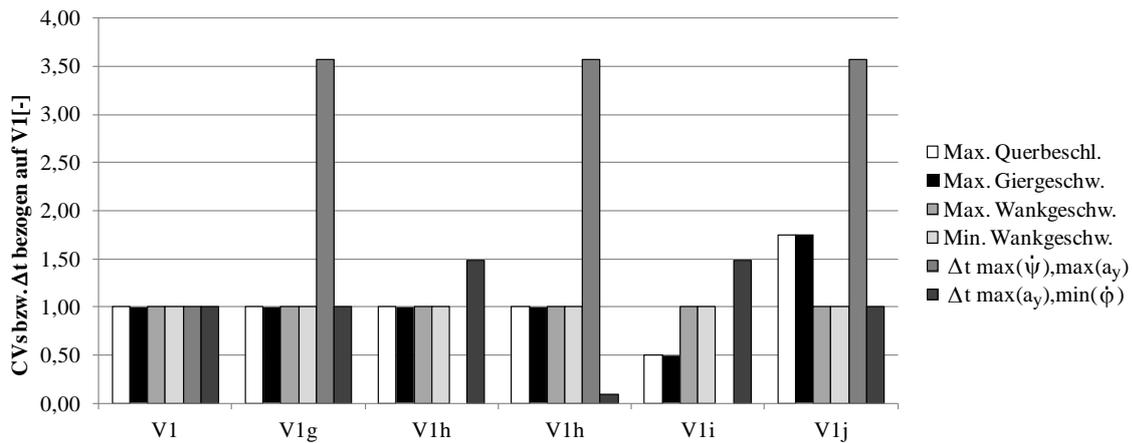


Abbildung 7.4.: Manörovorgaben V1g-j einer Überzeichnung einzelner zeitlicher Charakteristika der Fahrzeugreaktion bezogen auf V1

werden auch hier die Zeitverzögerungen zwischen den Peakwerten der maximalen Giergeschwindigkeit und der maximalen Querbeschleunigung sowie der maximalen Querbeschleunigung und der minimalen Wankgeschwindigkeit aufgezeigt.

Die Vorgabe der Fahrzeugreaktion erfolgt zum Einen durch Simulationsergebnisse unterschiedlicher Fahrzeugmodelle bei Anregung durch die generische, instationäre Böenfolge. Die Vorgaben der Fahrzeugreaktionen im Rahmen der einzelnen Manöver im Fahrsimulator wurden aus Simulationsergebnissen der in Tabelle 4.1 beschriebenen Fahrzeuge V1, V2, V3, V5 und V6 abgeleitet. Die hierbei durchgeführte Auswahl der Fahrzeugmodelle erfolgt zur Realisierung von unterschiedlichen Fahrzeugreaktionen im Rahmen der Simulatorstudie. Die folgende Abbildung 7.5 zeigt die VRCs der Bewegungsgrößen betrachteten Fahrzeuge V1, V2, V3, V5 und V6 bezogen auf die Bewegungsgrößen des Fahrzeuges V1.

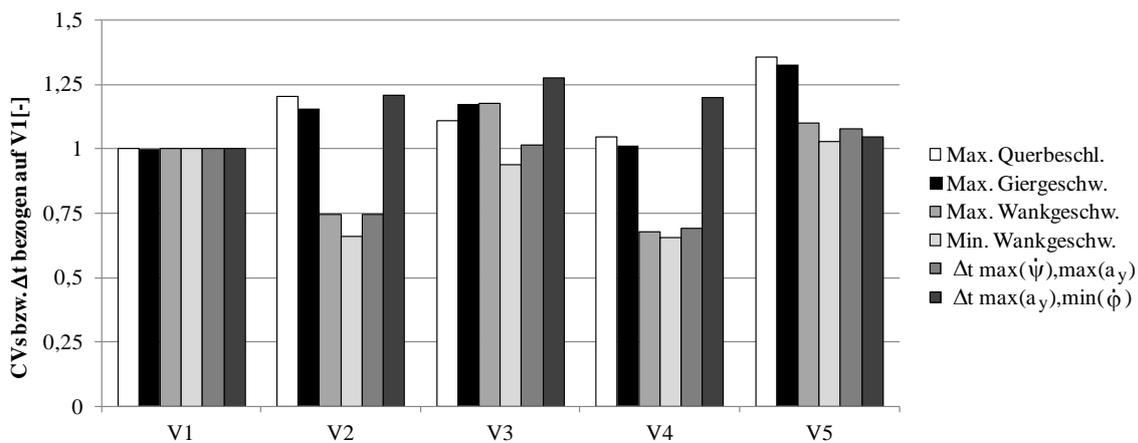


Abbildung 7.5.: Manörovorgaben der Fahrzeugreaktion V1, V2, V3, V5 und V6 auf eine instationäre, generische Böe bezogen auf V1

Um ein breites Spektrum der kombinierten Variation der Fahrzeugreaktion zu realisieren, wurde auch hier die Fahrzeugantwort des Fahrzeuges V1 zusätzlich variiert. Dazu wurden einzelne Kenngrößen der instationären Anregung variiert, so dass eine kombinierte Änderung der Fahrzeugreaktion ( $V1\alpha - \epsilon$ ) entsteht. In der folgenden Abbildung 7.6 sind die VRCs der Bewegungsgrößen der für die Untersuchung realisierte Variation der Fahrzeugantwort auf die generische, instationäre Böenfolge dargestellt. Die Bewegungsgrößen sind auch hierbei auf die Fahrzeugantwort des Fahrzeugs V1 bezogen.

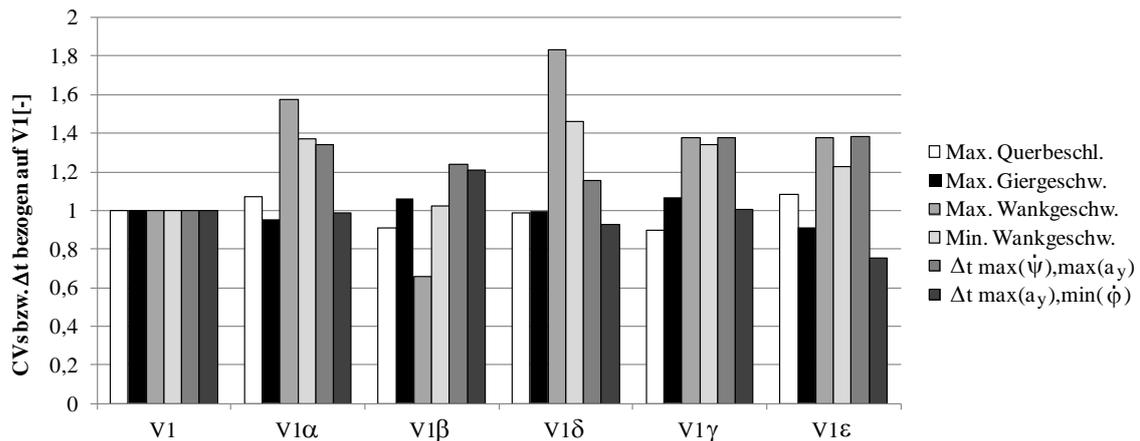


Abbildung 7.6.: Kombinierte Variation der Fahrzeugreaktion des Fahrzeuges V1 durch Änderung der generische, instationäre Böenfolge

Die hier berechneten Fahrzeugbewegungen dienen als Vorgaben für den zweiten Durchgang der Probandenstudie im dynamischen Fahrsimulator. Somit lässt sich ein Versuchsprogramm mit  $n = 10$  Manövern unterschiedlicher Fahrzeugbewegungen realisieren.

### 7.2.2. Bewertung der Fahrzeugbewegung durch die Probanden

Im Rahmen der durchgeführten Studie wird die subjektive Wahrnehmung der unterschiedlichen Fahrzeugreaktionen durch die Versuchspersonen in Form eines Fragebogens ermittelt. Nach der Fahrt eines Manövers im dynamischen Fahrsimulator wird die Bewertung durch den Probanden über den Fragebogen durchgeführt. Die hierbei zu beantwortenden Fragen haben eine unterschiedliche Zielsetzung. Zum Einen wird über eine Frage die generelle Empfindung der allgemeinen Störgröße der Fahrzeugreaktion bewertet. Zum Anderen wird über zusätzliche Fragen die Störgröße einzelner Charakteristika der Fahrzeugreaktion bewertet. Dabei wird die jeweilige Störgröße der Querbewegung, der Wankbewegung und der Gierbewegung erfragt.

Um die Bewertung des qualitativen Verlaufs der Fahrzeugreaktion durch die Probanden zu realisieren, wird die subjektive Wahrnehmung des zeitlichen Aufbaus der Bewegungsgrößen erfragt. Voruntersuchungen haben gezeigt, dass eine Zuordnung der Zeitverzögerungen zu einzelnen Amplitudenwerten der Freiheitsgrade des Fahrzeugaufbaus durch die Probanden nur eingeschränkt möglich ist. Deshalb wird die Fragestellung zur Bewertung der zeitlichen Zusammensetzung allgemein formuliert und nicht auf die einzelnen Bewegungsgrößen der Fahrzeugreaktion bezogen.

Der Proband kann anhand des Fragebogens die subjektive Wahrnehmung der Fahrzeugreaktion über 25 verschiedene Abstufungen durch einen Bewertungsindex beschreiben. Im ersten Teil der Studie erfolgt die Bewertung relativ bezogen auf die Fahrzeugreaktion des Fahrzeugs V1 und im zweiten Teil der Studie absolut. Die Abstufungen können dabei beispielsweise eine Variation der Bewertung von „nicht störend“ bis „stark störend“ aufweisen. Tabelle 7.1 zeigt die zur Erstellung des Fragebogens genutzten Fragestellungen sowie eine Erläuterung der Abstufungen der möglichen Bewertung durch die Probanden.

<b>Bewertungskriterium</b>	<b>Fragestellung</b>	<b>Bewertung = 1</b>	<b>Bewertung = 25</b>
Allgemeine Bewertung	Wie störend haben Sie die Fahrzeugreaktionen empfunden?	nicht-störend	sehr störend
Wahrnehmung Querbewegung	Wie haben Sie die Fahrzeugreaktionen bezüglich der Querbewegung empfunden?	sehr leichte Beschleunigung	sehr starke Beschleunigung
Wahrnehmung Gieren	Wie haben Sie die Fahrzeugreaktionen bezüglich der Giergeschwindigkeit empfunden?	Fahrzeug giert sehr schwach	Fahrzeug giert sehr stark
Wahrnehmung Wanken	Wie haben Sie die Fahrzeugreaktionen bezüglich der Wankgeschwindigkeit empfunden?	Fahrzeug wankt sehr schwach	Fahrzeug wankt sehr stark
Zeitliche Zusammensetzung	Wie haben sich die Bewegungsgrößen zeitlich aufgebaut?	gleichzeitig	sehr stark zeitversetzt

Tabelle 7.1.: Bewertungskriterien und Fragestellungen des Fragebogens der Probandenstudie im dynamischen Fahrsimulator

### 7.3. Auswertung der Probandenstudie

Zur Objektivierung des Störungsverhaltens von Personenkraftwagen gilt es, die durch den Fragebogen durchgeführte Bewertung der Probanden zu analysieren. Die durchgeführte Bewertung ist dabei in Bezug zu den vorgegebenen Variationen der Bewegungsgrößen des Fahrzeugaufbaus zu setzen. Im Folgenden werden nur die Bewegungsgrößen betrachtet, die nach Abschnitt 2.5.1 durch den Vergleich mit den minimalen Wahrnehmungsschwellen der Fahrerwahrnehmung aufzulösen wären. Zunächst wird die Verteilung der Bewegungskenngrößen sowie der mittleren Probandenbewertung der einzelnen Manöver in Form einer Kastengrafik nach [105] aufgetragen. Daraus kann der Median, das Obere und Untere Quantil und das Minimum und Maximum einer Messreihe abgelesen werden.

### 7.3.1. Bewertung einer Änderung einzelner Bewegungsgrößen

Im Rahmen des ersten Durchgangs der Studie erfolgt die Bewertung der Probanden relativ, d. h. die Bewertung des jeweiligen Manövers wird in Relation zur Bewertung des Manövers des Fahrzeuges V1 durchgeführt. In Abbildung 7.7 (a) ist die Verteilung der Fahrzeugaufbaubewegung der hierbei realisierten 11 Versuchsmanöver als Kastengrafik aufgezeigt. Die Bewegungsgrößen  $VRC_{Ref}$  sind dabei auf die Fahrzeugantwort des Fahrzeuges V1 bezogen. Abbildung 7.7 (b) zeigt die Verteilung der durch die Probanden durchgeführten relativen Bewertung der Fahrzeugbewegung. Aus der Kastengrafik lässt sich Median, unteres und oberes Quantil sowie Minimum und Maximum der Bewegungs- und Bewertungsgrößen ablesen.

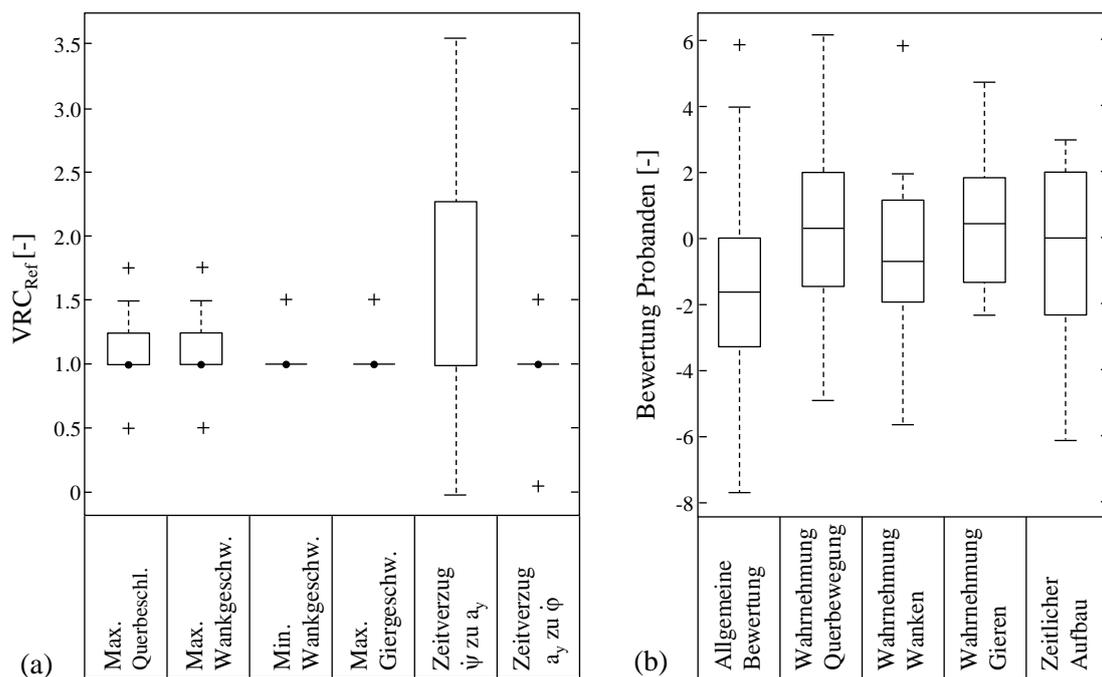


Abbildung 7.7.: Kastengrafik zur Verteilung der  $VRC_{Ref}$  betrachteten Fahrzeugantworten (a) und die Verteilung des Mittelwertes der Bewertung durch die Probanden (b) für Versuchsdurchgang 1

Um Zusammenhänge der Fahrzeugreaktion und der Bewertung der Probanden zu identifizieren, werden die jeweiligen Mittelwerte der durchgeführten Bewertung und die Kenngrößen der Fahrzeugbewegung gegenübergestellt. Bei Annahme einer linearen Abhängigkeit der subjektiven Wahrnehmung der Probanden von den einzelnen Kenngrößen der Fahrzeugreaktion kann die Steigung des linearen Zusammenhangs über den Regressionskoeffizienten bestimmt werden. Als Beispiel sind in Abbildung 7.8 die Mittelwerte der Bewertung durch die Probanden für die Kriterien „Allgemeine Bewertung“ (a) und „Wahrnehmung Querbewegung“ (b) gegenüber der Kenngröße  $VRC_{Ref}$  der maximalen Querbeschleunigung aufgetragen.

Zur Untersuchung des Zusammenhangs der Fahrzeugantwort und der Fahrerwahrnehmung wird der empirische Korrelationskoeffizient der Bewegungsgrößen der Fahrzeugantwort und der ermittelten mittleren Probandenbewertung  $y$  der einzelnen Versuchsmanöver  $Kor_e(x, y)$  nach Pearson entsprechend Anhang A.2 berechnet. In Tabelle 7.2 sind die Korrelationskoeffizienten

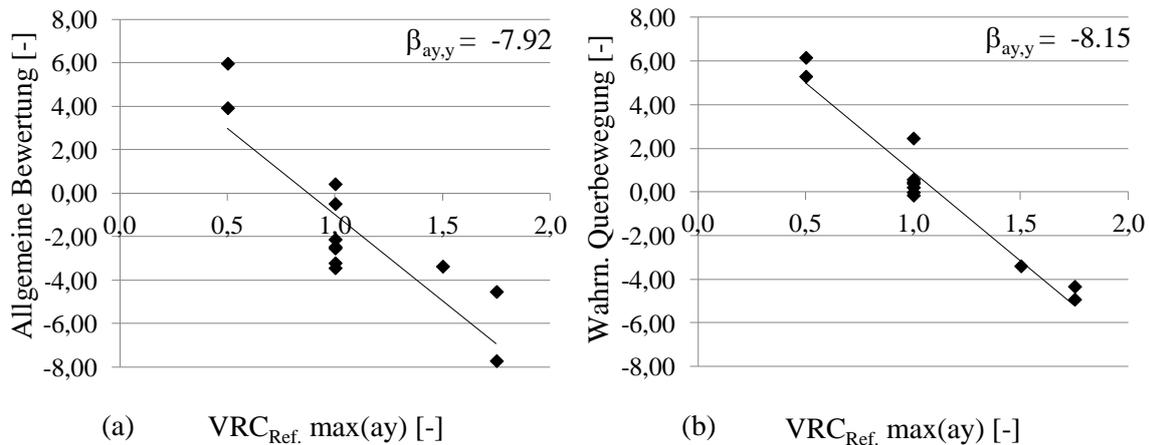


Abbildung 7.8.: Gegenüberstellung Probandenbewertung für „Allgemeine Bewertung“ (a) und „Wahrnehmung Querbewegung“ (b) zur maximalen Querbewegung für Versuchsdurchgang 1

der Probandenbewertung und der Bewegungskenngrößen des ersten Durchgangs der Probandenstudie aufgeführt.

<b>Korrelationskoeffizient</b> $Kor_e(x, y)$	$\max(a_y)$	$\max(\dot{\varphi})$	$\max(\dot{\psi})$	$\Delta t_{\dot{\psi}-a_y}$	$\Delta t_{a_y-\dot{\varphi}}$
<b>Allgemeine Bewertung</b>	-0.86	-0.04	-0.64	-0.62	0.41
<b>Wahrnehmung Querbewegung</b>	-0.97	0.02	-0.40	-0.39	0.24
<b>Wahrnehmung Wanken</b>	-0.39	-0.59	-0.21	-0.36	0.49
<b>Wahrnehmung Gieren</b>	-0.61	-0.01	-0.87	-0.51	0.36
<b>Zeitlicher Aufbau</b>	-0.36	0.00	-0.55	-0.84	0.45

Tabelle 7.2.: Korrelationkoeffizienten für ausgewählte Kenngrößen der Fahrzeugreaktion  $VRC_{Ref,i}$  und der Bewertung für Versuchsdurchgang 1

Über die Berechnung des Korrelationskoeffizienten kann ein möglicher linearer Zusammenhang der Kenngrößen ermittelt werden. Die größten Werte für die Korrelationskoeffizienten ergeben sich dabei für Kombinationen der einzelnen Amplituden der Bewegungsgrößen und der jeweiligen Bewertung dieser Bewegungsgröße. Der Korrelationskoeffizient für die maximale Querbewegung beträgt hierbei -0.97, für die maximale Giergeschwindigkeit -0.87 sowie für die maximale Wankgeschwindigkeit -0.59. Für die Bewertung des zeitlichen Antwortverhaltens des Fahrzeuges ergibt sich ein maximaler Korrelationskoeffizient von -0.84 für den Zeitverzug zwischen maximaler Giergeschwindigkeit und maximaler Querbewegung. Das negative Vorzeichen des Korrelationskoeffizienten bestätigt Erfahrungen aus dem Fahrversuch, dass eine Verringerung des Zeitverzugs zu einer Verbesserung der subjektiven Wahrnehmung der

## 7. Objektivierung der subjektiven Fahrerwahrnehmung

Fahrzeugreaktion unter Seitenwind führt. Zur allgemeinen Bewertung der Störgröße der Fahrzeugreaktion lässt sich bei dieser Versuchsreihe der höchste Korrelationsfaktor von -0.86 für die maximale Querbeschleunigung ermitteln, gefolgt von -0.64 für die maximale Giergeschwindigkeit und -0.62 für den Zeitverzug zwischen maximaler Giergeschwindigkeit und maximaler Querbeschleunigung.

Durch die Berechnung eines Konfidenzniveaus mittels der Studentschen t-Verteilung nach Anhang A.2 wird die Zutreffenswahrscheinlichkeit der angenommenen Abhängigkeit, entsprechend der berechneten Pearsonkorrelation, durch einen Hypothesentest überprüft. In Tabelle 7.3 sind die Werte der t-Verteilung der berechneten Korrelationskoeffizienten aufgeführt.

t-Distribution $t_{x,y}$	$\max(a_y)$	$\max(\dot{\varphi})$	$\max(\dot{\psi})$	$\Delta t_{\dot{\psi}-a_y}$	$\Delta t_{a_y-\dot{\varphi}}$
<b>Allgemeine Bewertung</b>	5.45	0.13	2.66	2.50	1.41
<b>Wahrnehmung Querbewegung</b>	12.32	0.07	1.40	1.33	0.78
<b>Wahrnehmung Wanken</b>	1.33	2.30	0.69	1.20	1.78
<b>Wahrnehmung Gieren</b>	2.46	0.05	5.48	1.88	1.22
<b>Zeitlicher Aufbau</b>	1.23	0.00	2.08	4.98	1.60

Tabelle 7.3.: t-Verteilung für ausgewählte Kenngrößen der Fahrzeugreaktion  $VRC_{Ref,i}$  und der Bewertung für Versuchsdurchgang 1

Für einen zweiseitigen Vertrauensbereich und  $v = n-1$  Freiheitsgrade wird das Konfidenzniveau bestimmt. Hierbei ist  $n$  der Stichprobenumfang, somit die im Rahmen der Probandenstudie betrachtete Anzahl der Manöver  $n = 11$ . Tabelle 7.4 zeigt die aus der t-Verteilung bestimmten Konfidenzniveaus der in Tabelle 7.2 aufgezeigten Korrelationskoeffizienten für Kombinationen ausgewählter Amplituden der Fahrzeugbewegung  $VRC_{Ref,i}$  und den mittleren Werten der Probandenbewertung. Um hierbei die Werte einer signifikanten Korrelation zu identifizieren, sind nur die Konfidenzniveaus  $P_{zw} \geq 0.95$  aufgezeigt.

Betrachtet man die Konfidenzniveaus in Tabelle 7.4 und die zugehörigen Korrelationskoeffizienten der Amplitudenwerte aus Tabelle 7.2 so wird deutlich, dass der Fahrer eine Änderung der Störgröße einzelner Fahrzeugfreiheitsgrade sicher zuordnen kann. Trotz der geringen Amplituden der Aufbaugrößen im Bereich der Wahrnehmungsschwellen ergeben sich Werte des Konfidenzniveaus zwischen 0.95 und 0.999. Dies bestätigt eine sehr gute Korrelation der maximalen Querbeschleunigung, Giergeschwindigkeit und Wankgeschwindigkeit mit der Bewertung der Störungsgröße der jeweiligen Freiheitsgrade durch den Probanden.

Zur allgemeinen Bewertung des Störungsverhaltens durch die Probanden in dieser Versuchsreihe lässt sich für drei Kenngrößen der Fahrzeugreaktion ein Konfidenzniveau über 0.95 berechnen. Dabei ist das Konfidenzniveau für die maximale Querbeschleunigung 0.999 und für die maximale Giergeschwindigkeit sowie für den Zeitverzug zwischen maximaler Giergeschwindigkeit und maximaler Querbeschleunigung 0.95. Daraus lässt sich ableiten, dass diese drei Größen

Konfidenzniveau $P_{zw}$	$\max(a_y)$	$\max(\dot{\varphi})$	$\max(\dot{\psi})$	$\Delta t_{\dot{\psi}-a_y}$	$\Delta t_{a_y-\dot{\varphi}}$
<b>Allgemeine Bewertung</b>	0.999	-	0.95	0.95	-
<b>Wahrnehmung Querbewegung</b>	0.999	-	-	-	-
<b>Wahrnehmung Wanken</b>	-	0.95	-	-	-
<b>Wahrnehmung Gieren</b>	0.95	-	0.999	-	-
<b>Zeitlicher Aufbau</b>	-	-	-	0.999	-

Tabelle 7.4.: Konfidenzniveau der Korrelationskoeffizienten  $P_{zw} \geq 0.95$  für Amplituden der Fahrzeugbewegung  $VRC_{Ref,i}$  und den Mittelwerten der Bewertung für Versuchsdurchgang 1

die Haupteinflussfaktoren auf die subjektive Wahrnehmung des Störungsverhaltens bei einer Änderung einzelner Bewegungsgrößen sind.

Es gilt zu klären, ob die hier ermittelte Hierarchie der subjektiven Wahrnehmung einzelner Bewegungsgrößen auf die absolute Bewertung des Störungsverhaltens unter Seitenwind übertragen werden kann. Betrachtet man die Gegenüberstellung der allgemeinen Bewertung der Fahrzeugreaktion der Probanden und der maximalen Querbewegung in Abbildung 7.8 (a), so kann die Steigung der linearen Abhängigkeit durch Berechnung des Regressionskoeffizienten ermittelt werden.

Die hierbei berechneten Werte der Regressionskoeffizienten können als Wertungsfaktoren zur Gewichtung der einzelnen CVs bzw. der in Kapitel 6 beschriebenen SIs der Fahrwerksparameter nach (7.4) genutzt werden.

$$\mu_{kl} \approx \beta_{xy} \quad (7.4)$$

Aus den Regressionskoeffizienten der im ersten Durchgang der Probandenstudie für die Bewertungskategorie „Allgemeine Wahrnehmung“ als relevant identifizierten Bewegungsgrößen kann ein Bewertungsfaktor  $\Omega_h$  nach Gleichung (7.5) abgeleitet werden. Die Wertungsfaktoren werden dazu als referenzierte Werte bezogen auf den Regressionskoeffizienten  $\beta_{a_y, y}$  vorgegeben.

$$\Omega_h = \max(a_{y,h}) + 0.83\max(\dot{\psi}_h) + 0.22\Delta t_{\dot{\psi}-a_y} \quad (7.5)$$

Umso höher der ermittelte Wert von  $\Omega_h$ , desto schlechter die subjektive Bewertung des Fahrzeugreaktion für das Kriterium „Allgemeine Bewertung des Störungsverhaltens“. Die hierbei aufgezeigte Gleichung bestätigt die aus der Literatur bekannte Reihung der Einflussgröße der Querbewegung und Giergeschwindigkeit bei Manövern höherer Querbewegung, für die Bewertung kombinierter, stoßförmiger Fahrzeugaufbaubewegung im Bereich der Wahrnehmungsschwelle. Auch die geringe Korrelation der Wankgeschwindigkeit der Reaktion auf Seitenwind deckt sich mit der in der Literatur beschriebenen Erfahrung einer Reihung der Ein-

flussgröße nach Querbesehleunigung, Gier- und Wankgesehwindigkeit bei Manövern höherer Querbesehleunigung.

Darüberhinaus können die Regressionskoeffizienten der Bewegungsgrößen und der Probandenbewertung des zugehörigen Bewertungskriteriums wie in Abbildung 7.8 (a) für die Querbesehleunigung dargestellt ein Bewertungsfaktor  $\Theta_h$  nach Gleichung (7.6) abgeleitet werden. Die Wertungsfaktoren werden dazu als referenzierte Werte bezogen auf den Regressionskoeffizienten  $\beta_{ay}, y$  vorgegeben.

$$\Theta_h = \max(a_{y,h}) + 0.04\max(\dot{\varphi}_h) + 0.14\max(\dot{\psi}_h) + 0.21\Delta t_{\dot{\psi}-a_y} \quad (7.6)$$

Inwiefern die hierbei aufgezeigten linearen Ansätze aus relativen Bewertungsgrößen zur Ableitung einer allgemeinen Bewertungsgröße des Störungsverhaltens von Personenkraftwagen bei Fahrzeugreaktionen im Bereich der Wahrnehmungsschwelle auf die absolute Bewertung der Fahrzeugreaktion bei aerodynamischen Störungen übertragbar sind, wird im Rahmen des zweiten Durchgangs der Versuchsreihe untersucht.

### 7.3.2. Absolute Bewertung allgemeiner Fahrzeugreaktion

Im zweiten Teil der Probandenstudie wird eine absolute Bewertung der Fahrzeugreaktion durch die Probanden durchgeführt. Dabei wird eine Reihe von Fahrzeugreaktionen unterschiedlicher Zusammensetzung entsprechend der Beschreibung in Abschnitt 7.2.1 vorgegeben. In Abbildung 7.9 (a) ist die Verteilung der Fahrzeugaufbaubewegung der 10 Versuchsmanöver als Kastengrafik aufgezeigt. Die Bewegungsgrößen  $VRC_{Ref}$  sind dabei auf die Fahrzeugantwort des Fahrzeuges V1 bezogen. Abbildung 7.9 (b) zeigt die Verteilung der durch die Probanden durchgeführte Bewertung der Fahrzeugbewegung. Aus der Kastengrafik lässt sich Median, unteres und oberes Quantil sowie Minimum und Maximum der Bewegungs- und Bewertungsgrößen ablesen.

Um Zusammenhänge zwischen den Kenngrößen der Fahrzeugreaktionen und der subjektiven Wahrnehmung der Probanden zu identifizieren, werden erneut die Werte der mittleren Bewertung und die Amplituden sowie Zeitverzögerungen der Fahrzeugbewegung gegenübergestellt. Als Beispiel sind in Abbildung 7.10 die Mittelwerte der Bewertung durch die Probanden für die Kriterien „Allgemeine Bewertung“ (a) und „Wahrnehmung Querbewegung“ (b) gegenüber der Kenngröße  $VRC_{Ref}$  der maximalen Querbesehleunigung aufgetragen. In den Abbildungen sind die Regressionskoeffizienten als Kenngröße der Abhängigkeiten bei Annahme eines linearen Zusammenhangs aufgeführt.

Auch hierbei wird der Korrelationskoeffizient  $Kor_e(x, y)$  der mittleren Probandenbewertung  $x$  und der Bewegungsgrößen der Fahrzeugreaktion  $y$  der Versuchsmanöver nach Pearson bestimmt. In der folgenden Tabelle 7.5 sind die Werte der Korrelationskoeffizienten für die Kombinationen ausgewählter Kenngrößen der Fahrzeugbewegung  $VRC_{Ref,i}$  und den Mittelwerten der Bewertungen entsprechend den definierten Bewertungskriterien durch die Probanden aufgetragen. Die Auswahl der Kenngrößen der Fahrzeugbewegung erfolgt entsprechend der Relevanz der aufgezeigten Ergebnisse.

Über die Berechnung des Korrelationskoeffizienten kann wiederum ein möglicher linearer Zusammenhang der Kenngrößen ermittelt werden. Die größten Werte für die Korrelationskoeffizienten ergeben sich hierbei erneut für Kombinationen einzelner Bewegungsgrößen und der

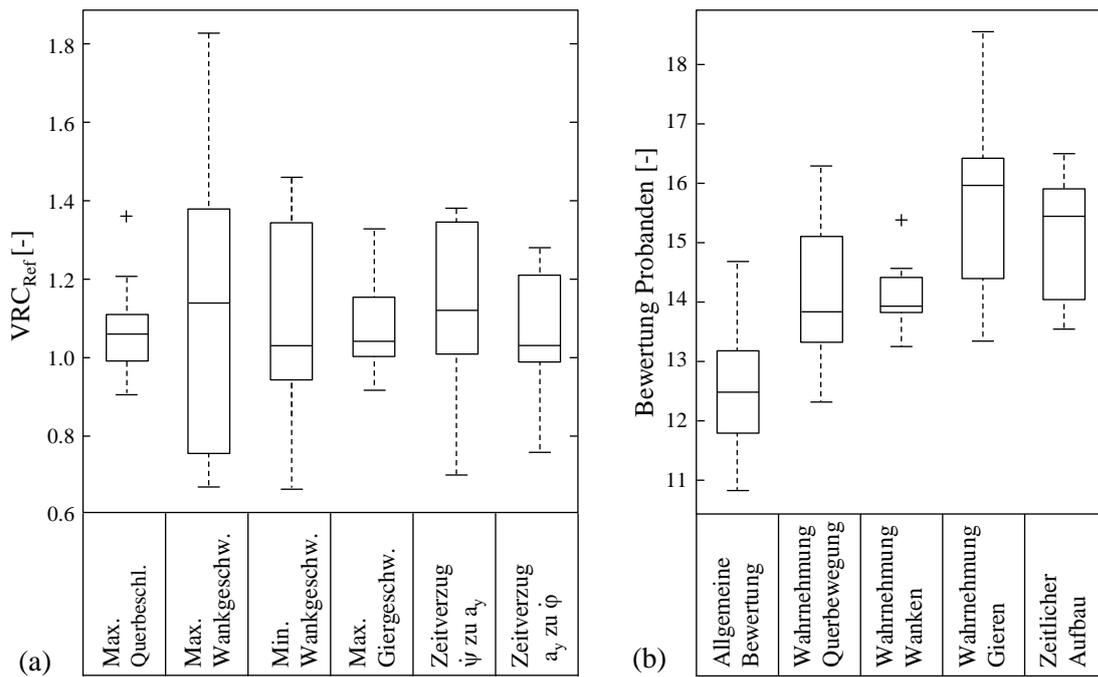


Abbildung 7.9.: Kastengrafik zur Verteilung der  $VRC_{Ref}$  betrachteten Fahrzeugantworten (a) und die Verteilung des Mittelwertes der Bewertung durch die Probanden (b) für Versuchsdurchgang 2

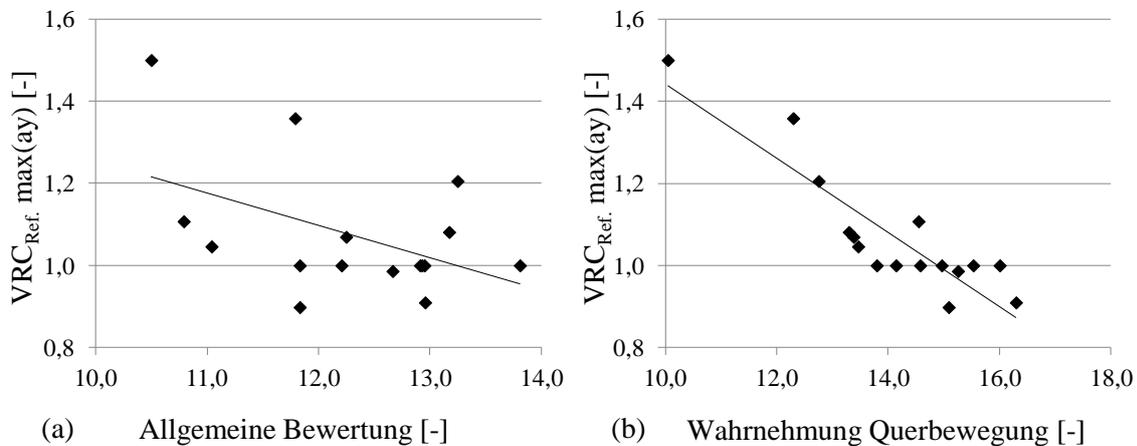


Abbildung 7.10.: Gegenüberstellung Probandenbewertung für „Allgemeine Bewertung“ (a) und „Wahrnehmung Querbewegung“ (b) zur maximalen Querbeschleunigung für Versuchsdurchgang 2

jeweiligen Bewertung dieser Bewegungsgröße. Die Korrelationskoeffizienten betragen hierbei für die maximale Querbeschleunigung -0,84, für die maximale Wankgeschwindigkeit -0,71 und für die maximale Giergeschwindigkeit -0,63. Für die Bewertungskategorie „Allgemeine Bewertung“ der Störgröße der aerodynamischen Anregung und die Amplitudenwerte der Fahrzeugreaktion lässt sich bei dieser Versuchsreihe nur ein maximaler Korrelationsfaktor von -0,36 für die

## 7. Objektivierung der subjektiven Fahrerwahrnehmung

<b>Korrelationskoeffizient</b> $Kor_e(x, y)$	$\max(a_y)$	$\max(\dot{\varphi})$	$\max(\dot{\psi})$	$\Delta t_{\dot{\psi}-a_y}$	$\Delta t_{a_y-\dot{\varphi}}$
<b>Allgemeine Bewertung</b>	-0.18	-0.04	-0.36	0.11	-0.41
<b>Wahrnehmung Querbewegung</b>	-0.84	0.09	-0.27	0.36	0.14
<b>Wahrnehmung Wanken</b>	0.32	-0.71	0.28	-0.42	0.30
<b>Wahrnehmung Gieren</b>	-0.30	0.12	-0.63	0.18	-0.59
<b>Zeitlicher Aufbau</b>	0.39	-0.04	-0.13	-0.23	-0.35

Tabelle 7.5.: Korrelationkoeffizienten für ausgewählte Kenngrößen der Fahrzeugreaktion  $VRC_{Ref,i}$  und der Bewertung für Versuchsdurchgang 2

maximale Giergeschwindigkeit ermitteln. Für den Einfluss der zeitlichen Zusammensetzung der Fahrzeugreaktion zeigt sich ein Korrelationsfaktor von -0.41 für die „Allgemeine Bewertung“. Für das Bewertungskriterium „Zeitliche Zusammensetzung“ ist ein maximaler Korrelationskoeffizient von 0.39 für die maximale Querbewegung zu identifizieren.

Der Vertrauensintervall der hierbei ermittelten Werte der Korrelationskoeffizienten für die Abschätzung einer linearen Abhängigkeit wird im Folgenden betrachtet. Dazu wird erneut das Konfidenzniveau mittels der Studentischen t-Verteilung nach Anhang A.2 berechnet. Auch hier ist  $n$  der Stichprobenumfang, somit die Anzahl der im Rahmen der Probandenstudie betrachteten Manöver  $n = 10$ . Tabelle 7.6 zeigt die berechneten Werte der t-Verteilung für die Versuchsreihe 2 der Probandenstudie.

<b>t-Distribution <math>t_{x,y}</math></b>	$\max(a_y)$	$\max(\dot{\varphi})$	$\max(\dot{\psi})$	$\Delta t_{\dot{\psi}-a_y}$	$\Delta t_{a_y-\dot{\varphi}}$
<b>Allgemeine Bewertung</b>	0.50	0.12	1.10	.32	1.27
<b>Wahrnehmung Querbewegung</b>	4.36	0.26	0.79	1.09	0.41
<b>Wahrnehmung Wanken</b>	0.95	2.85	0.81	1.30	0.90
<b>Wahrnehmung Gieren</b>	0.88	0.35	2.31	0.53	2.08
<b>Zeitlicher Aufbau</b>	1.20	0.12	0.37	0.66	1.06

Tabelle 7.6.: t-Verteilung für ausgewählte Kenngrößen der Fahrzeugreaktion  $VRC_{Ref,i}$  und der Bewertung für Versuchsdurchgang 2

Für einen zweiseitigen Vertrauensbereich und  $v = n-1$  Freiheitsgrade wird auch hier aus den Werten der t-Verteilung das Konfidenzniveau bestimmt. Dabei ist der Stichprobenumfang  $n$  im Rahmen der Probandenstudie betrachtete Anzahl der Manöver  $n = 10$ . Tabelle 7.7 zeigt die aus der t-Verteilung bestimmten Konfidenzniveaus der aufgezeigten Korrelationskoeffizienten

für die Kombinationen der Fahrzeugbewegung  $VRC_{Ref,i}$  und der mittleren Bewertung aus Versuchsreihe 2 der Probandenstudie. Dabei sind auch hier nur die Werte der Konfidenzniveaus aufgezeigt, die  $P_{zw} \geq 0.95$  entsprechen.

Konfidenzniveau $P_{zw}$	$\max(a_y)$	$\max(\dot{\varphi})$	$\max(\dot{\psi})$	$\Delta t_{\dot{\psi}-a_y}$	$\Delta t_{a_y-\dot{\varphi}}$
<b>Allgemeine Bewertung</b>	-	-	-	-	-
<b>Wahrnehmung Querbewegung</b>	0.998	-	-	-	-
<b>Wahrnehmung Wanken</b>	-	0.980	-	-	-
<b>Wahrnehmung Gieren</b>	-	-	0.990	-	-
<b>Zeitlicher Aufbau</b>	-	-	-	-	-

Tabelle 7.7.: Konfidenzniveau der Korrelationskoeffizienten  $P_{zw} \geq 0.95$  für Amplituden der Fahrzeugbewegung  $VRC_{Ref,i}$  und den Mittelwerten der Bewertung für Versuchsdurchgang 2

Betrachtet man die hier aufgezeigten Werte des Konfidenzniveaus, so lässt sich in Versuchsreihe 2 für die Bewertungskategorie „Allgemeine Bewertung“ des Störungsverhalten durch die Probanden kein Wert des Konfidenzniveaus über 0.95 berechnen. Jedoch ist für die Amplitudenwerte der Störgrößen und den zugehörigen Bewertungen der subjektiven Wahrnehmung der entsprechenden Störgröße ein Konfidenzniveau über 0.95 zu identifizieren. Dies bedeutet, dass der Amplitudenwert der jeweiligen Bewegungskenngröße durch die Probanden klar zugeordnet werden kann, obwohl die Amplitudenwerte dabei nur geringfügig oberhalb der Wahrnehmungsschwelle sind. Somit kann eine Art von Maskierungseffekt einzelner Amplitudengrößen durch andere Bewegungsgrößen nicht festgestellt werden. Sollte zum Beispiel die Fahrzeugreaktion der Wankgeschwindigkeit durch den Probanden subjektiv nicht wahrgenommen werden können, da das mögliche Auflösungsvermögen kombinierter Fahrzeugbewegungen durch eine andere Kenngröße der Fahrzeugreaktion wie zum Beispiel der Giergeschwindigkeit komplett ausgeschöpft wird, wären hierbei geringere Werte der einzelnen Konfidenzniveaus zu erwarten.

Durch die aufgezeigten Werte der Korrelationskoeffizienten und Konfidenzniveaus wird deutlich, dass die allgemeine, absolute Bewertung des Störungsverhaltens von Personenkraftwagen nicht durch eine einzelne Kenngröße der Fahrzeugreaktion bestimmt wird. Deshalb werden die Ansätze zur Berechnung eines allgemeinen Bewertungsfaktors  $\Omega_h$  nach Gleichung (7.5) und  $\Theta_h$  nach Gleichung (7.6) genutzt. Mit den Bewegungsgrößen der Manöver aus Versuchsreihe 2 werden die beiden allgemeinen Bewertungsfaktoren  $\Omega_h$  und  $\Theta_h$  berechnet und der Bewertungskategorie „Allgemeine Bewertung“ der Probandenbewertung gegenübergestellt. Abbildung 7.11 zeigt die Gegenüberstellung der einzelnen Kenngrößen.

Betrachtet man die hierbei aufgezeigte Gegenüberstellung lässt sich eine lineare Abhängigkeit der Kenngrößen nur eingeschränkt ableiten. Bei einer Berechnung des Korrelationskoeffizienten nach Pearson ergibt sich dabei ein Wert von -0.27 für  $\Omega_h$  und -0.18 für  $\Theta_h$ . Für die t-Verteilung

## 7. Objektivierung der subjektiven Fahrerwahrnehmung

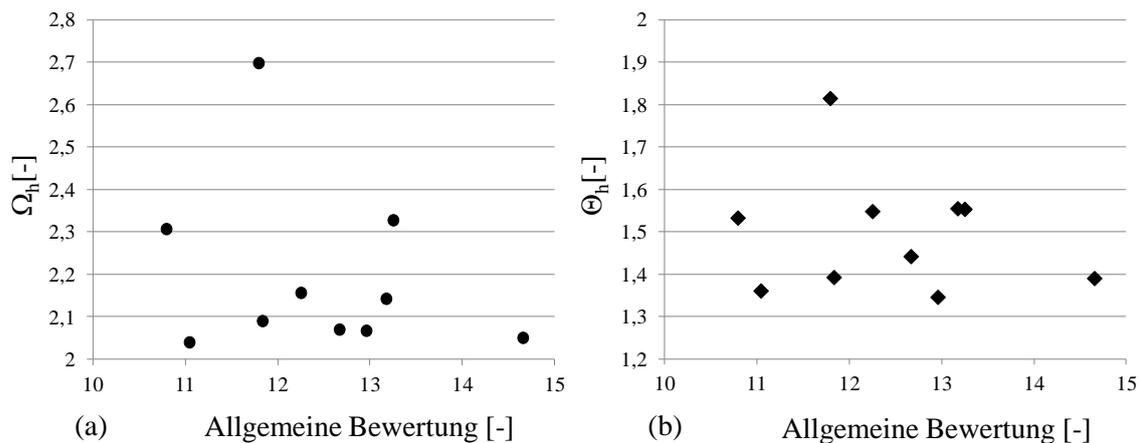


Abbildung 7.11.: Gegenüberstellung Probandenbewertung der „Allgemeine Bewertung“ mit den Bewertungsfaktoren (a)  $\Omega_h$  und (b)  $\Theta_h$  für Versuchsdurchgang 2

lässt sich dabei ein Wert von 0,83 für  $\Omega_h$  und 0,51 für  $\Theta_h$  ermitteln. Dies führt zu einem Konfidenzniveau deutlich unterhalb 0,95. Die Bewertungsfaktoren zeigen somit keine Korrelation zur durchgeführten subjektiven, absoluten Bewertung der Probanden in Versuchsreihe 2.

Zusammengefasst kann aus der vorliegenden Untersuchung klar der Einfluss einer Amplitudenänderung der maximalen Querbeschleunigung, der maximalen Giergeschwindigkeit und dem Zeitverzug der beiden Aufbaugrößen auf die subjektive Wahrnehmung einer aerodynamischen Böenanstregung eines geringeren Amplitudenniveaus identifiziert werden. Für eine Änderung einzelner, relevanter Bewegungsgrößen des Fahrzeugaufbaus lässt sich eine Hierarchie der Einflussgröße auf die subjektive Wahrnehmung ableiten. Daraus lässt sich ein Wertungsfaktor für Maßnahmen ableiten, die einzelne Bewegungsgrößen des Fahrzeugaufbaus beeinflussen. Die hierbei ermittelten Wertungsfaktoren lassen sich jedoch nicht auf die Ableitung einer absoluten Bewertung der Fahrzeugreaktion unter Seitenwind mit einem geringeren Anregungsniveau übertragen. Die Wertungsfaktoren stellen ein Maß für den Zusammenhang einer angenommenen, linearen Abhängigkeit zwischen der Bewegungskenngroße und der subjektiven Wahrnehmung dar. Aus den Ergebnissen der Versuchsreihe 2 lässt sich ableiten, dass die Einflussgröße einzelner Änderungen der Fahrzeugreaktion nicht durch Superposition zur Ableitung einer absoluten, generischen Bewertungskenngroße genutzt werden kann. Dies kann in einem möglichen, nicht-linearen Einfluss der Zusammensetzung der Fahrzeugreaktion auf die subjektive Wahrnehmung des Fahrers begründet sein. Welche Auswirkungen diese Tatsache auf die Grundauslegung des Seitenwindverhaltens bei kleinen Störgrößen hat, wird im Folgenden erläutert.

## 8. Empfehlung zur Grundausslegung des Seitenwindverhaltens

Zur gesamthaften Betrachtung des Störungsverhaltens unter Seitenwind als ein Zielspinnenkriterium im Grundausslegungsprozess von Personenkraftwagen gilt es, eine neue Vorgehensweise in den empfohlenen Grundausslegungsprozess der Querdynamik [102, 107] einzubinden. Dazu ist neben der klassischen Betrachtung des Störungsverhaltens bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage, zur Überprüfung des sicherheitsrelevanten Fahrzeugverhaltens bei Starkwinden, die Fahrzeugreaktion bei kleinen, instationären Seitenwindböen zur komfortorientierten Ausprägung des Fahrverhaltens der Personenkraftwagen zu untersuchen.

Wie in Abschnitt 7 dargestellt, wurde die maximale Querbewegung als Haupteinflussfaktor der subjektiven Wahrnehmung von aerodynamischen Störgrößen bei Windanregungen im Bereich 2-3 Beaufort identifiziert. Betrachtet man die nicht-linearen Abhängigkeiten der Antwortamplituden von der zeitlichen Zusammensetzung der instationären aerodynamischen Anregung, so ist eine Priorisierung der Maßnahmen zur Reduktion der Fahrzeugantwort bezüglich der Querbewegung, der Giergeschwindigkeit sowie eine Verringerung des Zeitverzugs zwischen maximaler Giergeschwindigkeit und maximaler Querbewegung zielführend. Jedoch ist durch den Fahrer auch der Amplitudenwert der Wankgeschwindigkeit neben der Querbewegung und Giergeschwindigkeit als Störgröße unter Seitenwind klar identifizierbar. Entsprechend der ermittelten Korrelationskoeffizienten wäre eine Reihung der Einflussgröße einer Änderung einzelner Antwortgrößen abzuleiten. Hauptsächlich ist die Bewertung der Störgröße von einer Änderung der Querbewegung abhängig, gefolgt von der Giergeschwindigkeit und der Wankgeschwindigkeit. Inwiefern eine höhere Querbewegung durch zum Beispiel eine niedrigere Wankgeschwindigkeit oder durch einen geänderten zeitlichen Aufbau der Fahrzeugreaktion kompensiert werden kann, bleibt aufgrund der nicht-linearen Zusammenhänge der subjektiven Wahrnehmung kombinierter Aufbaubewegungen offen.

Aufgrund der instationären Anregungen, die sich aufgrund der Form und Proportion der Fahrzeuge unterscheiden, sowie den fahrzeugindividuellen, nicht-linearen Abhängigkeiten der Fahrzeugantwort von Anregungskenngrößen ist es notwendig, in der frühen Phase der Fahrzeug- und Fahrwerksentwicklung die Fahrzeugreaktion simulativ zu ermitteln. Da die berechnete Fahrzeugreaktion durch eine Ableitung generischer Bewertungsfaktoren nicht absolut bewertet werden kann, müssen die resultierenden Fahrzeugreaktionen im Bereich der Wahrnehmungsschwellen zur Bewertung des Seitenwindverhaltens im Versuch betrachtet werden. Zur Abklärung der subjektiven Wahrnehmung der Fahrzeugreaktion unter den Einflüssen instationärer aerodynamischer Seitenwindböen ist somit eine relative Gegenüberstellung der Fahrzeugreaktion beziehungsweise absolute Bewertung im dynamischen Fahrsimulator analog [181] zu empfehlen. Abbildung 8.1 zeigt eine Vorgehensweise zur Bewertung und Optimierung des Fahrzeugverhaltens bei Anregung durch eine Seitenwindböe.

## 8. Empfehlung zur Grundauslegung des Seitenwindverhaltens

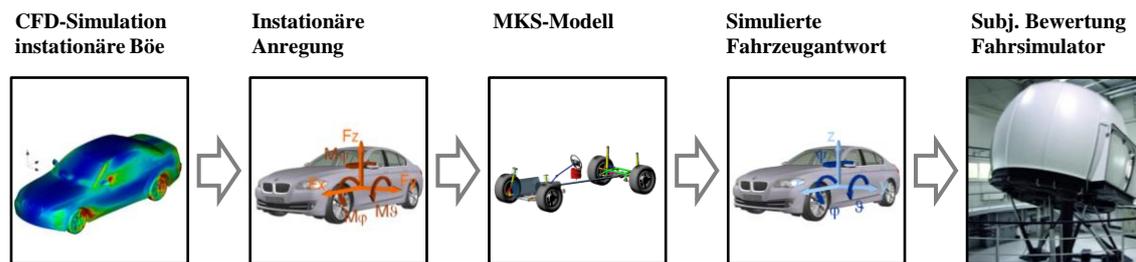


Abbildung 8.1.: Virtuelle Grundauslegungsmethode für Fahrzeug- und Fahrwerksarchitektur für das Seitenwindverhalten bei instationärer, aerodynamischer Anregung

Hierbei gilt es, in der frühen Phase des Grundauslegungsprozesses der Fahrzeug- und Fahrwerksentwicklung instationäre Charakteristika des aerodynamischen Kraft- und Momentenverlaufs von Seitenwindböen aus CFD-Simulationen abzuleiten. Alternativ können die karosserie-spezifischen, instationären Kenngrößen der aerodynamischen Anregung auch aus Messungen stationärer und instationärer Anregungen im Windkanalversuch ermittelt werden. Aus den identifizierten Kenngrößen kann eine generische, quasi-stationäre Seitenwindböe QSG entsprechend den instationären Charakteristika modifiziert werden. Die hierbei ermittelten Kraftverläufe der instationären, generischen Seitenwindböe USG werden zur Vorgabe für eine Simulation eines Open-Loop Manövers bei Geradeausfahrt genutzt. Mit Hilfe einer simulativen Abbildung der Fahrdynamik, z.B. durch ein Mehrkörpersimulationsmodell, wird die Fahrzeugreaktion ermittelt. Die berechnete Fahrzeugantwort dient dabei als objektives Maß für das Störungsverhalten des Personenkraftwagens bei einer instationären Anregung.

Im Fahr Simulatorversuch kann die Vorgabe der Fahrzeugreaktion unterschiedlicher Fahrzeugtypen, Fahrwerks- und Fahrzeugarchitekturen zum Vergleich der subjektiven Wahrnehmung der Fahrzeugreaktion genutzt werden. Das kundenwerte Störungsverhalten von Personenkraftwagen bei einer Anregung mit aerodynamischen Seitenwindböen und eventuell auftretender instationärer, aerodynamischer Effekte durchschnittlich auftretender Windstärken kann somit sichergestellt werden.

## 9. Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Arbeit werden zur Untersuchung des Seitenwindverhaltens von Personenkraftwagen auf Basis der dokumentierten Erkenntnisse der Literatur charakteristische, generische aerodynamische Anregungen vorgegeben. Zum Vergleich wird das Fahrzeugverhalten bei Anregung durch eine Seitenwindanlage im Bereich des Anregungsniveaus von Starkwinden als auch bei Anregung durch eine generische Seitenwindböe geringer Anregungsgröße unterschiedlicher Ausprägung betrachtet. Die aerodynamischen Anregungen mit Auswirkung auf den Fahrkomfort bei höheren Reisegeschwindigkeiten liegen dabei auf dem Niveau durchschnittlicher, real auftretender Windgeschwindigkeiten.

Die Fahrzeugreaktion unter den betrachteten aerodynamischen Anregungen wird simulativ ermittelt. Dabei wurde eine Validierung der Simulationsergebnisse für die beiden Anregungsniveaus mit Ergebnissen aus dem Fahrversuch realisiert. Die Validierung der Fahrzeugreaktion bei Anregung durch kleine Querkräfte erfolgt dabei durch einen neuartigen Ansatz in Form eines schienengeführten Massenpendels.

Derzeit wird nach ISO 12021-1 [74] zur Auslegung des Seitenwindverhaltens ein Versuch an einer Seitenwindanlage mit einer relativ hohen Anströmgeschwindigkeit im Bereich von Starkwinden empfohlen. Bei einem Vergleich der Simulationsergebnisse der Fahrzeugreaktion ausgewählter Fahrzeug- und Fahrwerkstypen, werden Unterschiede in der Fahrzeugreaktion in Abhängigkeit des Anregungsniveaus der aerodynamischen Kenngröße deutlich. Die hierbei aufgezeigten Unterschiede der Gegenüberstellung machen den Bedarf einer zusätzlichen Betrachtung geringerer Seitenwindniveaus für das komfortrelevante Seitenwindverhalten deutlich.

Nach Stand des Wissens wird eine Relevanz instationärer aerodynamischer Anregung für das Fahrverhalten auf Basis beispielhafter Untersuchungen angedeutet. In der vorliegenden Arbeit wird durch einen systematischen Ansatz eine Einflussanalyse instationärer aerodynamischer Anregungen auf die Fahrzeugbewegung realisiert. Es werden die Auswirkungen einer singulären sowie kombinierten Änderung einzelner Eigenschaften der aerodynamischen Anregung entsprechend instationären Charakteristika durch eine Simulationsreihe untersucht und quantifiziert. Dabei werden die Zusammenhänge zwischen Anregungsgröße und Fahrzeugreaktion für vergleichsweise geringe Anregungsniveaus erläutert. Vor allem die nicht-linearen Abhängigkeiten der Wankbewegung steht hierbei im Fokus. Es zeigt sich, dass Änderungen der zeitlichen Zusammensetzung der Anregungsgrößen im Vergleich zu Änderungen der Anregungsamplituden einer aerodynamischen Anregung eine für den Fahrer auflösbare Auswirkung auf die Fahrzeugreaktion haben. Daraus wird die Notwendigkeit einer Betrachtung instationärer, aerodynamischer Anregungen ergänzend zu den klassischen Methoden einer Auslegung bei Betrachtung der stationären Aerodynamik deutlich. Durch eine schrittweise Untersuchung instationärer Charakteristika einer repräsentativen aerodynamischen Seitenwindböe wurden die Auswirkungen der instationären Anregung untersucht. Dabei konnte die bei einer instationären Seitenwindböe erhöhte Giermomentenanregung als Haupteinflussfaktor auf die Fahrzeugreaktion identifiziert werden.

Wie in Abschnitt 2.5 beschrieben werden an diversen Stellen der Literatur die Auswirkungen von Fahrzeug- und Fahrwerksparametern auf das Seitenwindverhalten oftmals qualitativ beschrieben. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird durch eine simulative Variation von Fahrzeugen und Fahrwerksparametern der Einfluss der Kenngrößen auf das Störungsverhalten quantitativ ermittelt. Die bisher in der Literatur beschriebenen Einflussgrößen konnten dabei nur teilweise bestätigt werden. Zudem ist es durch die hier dargestellten Einflussfaktoren EF und Sensitivitätsindices SI möglich, die Einflussgröße von Fahrzeug- und Fahrwerksparameter sowie Anregungskenngrößen in Relation zu setzen. Es zeigen sich deutlich unterschiedliche Niveaus der Einflussgröße von Parameteränderungen der Fahrzeugene und des Fahrwerks. Der signifikante Einfluss des Reifens konnte auch für das Seitenwindverhalten bei Anregungsniveaus geringerer Größenordnung herausgearbeitet werden. Die Einflussgrößen der einzelnen Parameter können dabei in Abhängigkeit des Anregungsniveaus der aerodynamischen Anregung verglichen werden. Es werden die Einflussfaktoren von Fahrzeug- und Fahrwerksparameter auf die Fahrzeugreaktion bei Vorbeifahrt an einer Seitenwindanlage sowie bei Anregung durch die generische aerodynamische Böe geringerer Größenordnung gegenübergestellt. Es wird nachgewiesen, dass die Wirksamkeit von Stellhebeln der Fahrzeugparameter zur Verbesserung des Seitenwindverhaltens an der Seitenwindanlage auf aerodynamische Anregungen geringerer Größenordnung übertragbar ist.

Durch Betrachtung einer möglichen Variationsbreite werden über einen einfachen Ansatz die Größe der Stellhebel einzelner Fahrzeugparameter zur Verbesserung des Seitenwindverhaltens ermittelt. Die Variationsbreite wird dabei durch eine Fahrzeugauswahl der gleichen Fahrzeugklasse ermittelt. Zudem wird der Einfluss einzelner Bauteile genauer betrachtet. Die aufgezeigten Ergebnisse der Bauteileinflüsse lassen auf nicht-lineare Zusammenhänge multi-variater Parameteränderungen auf die Fahrzeugreaktion schließen. Dabei wird zudem der Einflussfaktor einer Änderung von Gummilagern auf das Seitenwindverhalten bei geringen Anregungsniveaus erstmalig untersucht. Bei Gegenüberstellung der Einflussfaktoren können die Auswirkungen von Gummilagereigenschaften im Vergleich zu Fahrzeugen oder Reifenkenngrößen als gering bezeichnet werden.

Im Zuge einer Probandenstudie werden objektive Kenngrößen der Fahrzeugreaktion mit der subjektiven Bewertung durch den Fahrer korreliert. Die Amplituden der betrachteten, kombinierten Aufbaubewegungen als Reaktion auf aerodynamische Anregungen befinden sich dabei geringfügig oberhalb der Wahrnehmungsschwelle. Detaillierte Untersuchungen zur subjektiven Wahrnehmung der komfortrelevanten Fahrzeugbewegung dieser Größenordnung sind für die Bewertung des Seitenwindverhaltens bisher nicht dokumentiert. Dabei zeigen sich Änderungen der Amplituden der maximalen Querschleunigung und Giergeschwindigkeit sowie der Zeitverzögerungen zwischen maximaler Querschleunigung und Giergeschwindigkeit als besonders relevant für die Bewertung des Störungsverhaltens von Personenkraftwagen. Über die Ermittlung eines Bewertungsfaktors aus den Regressionskoeffizienten der als relevant bewerteten Bewegungsgrößen wird ein Ansatz zur Einschätzung des Störungsverhaltens von Personenkraftwagen abgeleitet. Die Regressionskoeffizienten werden hierbei aus Änderungen einzelner Bewegungsgrößen abgeleitet. Werden die Bewertungsfaktoren für allgemeine Kombinationen der Fahrzeugreaktion unter Seitenwind mittels der abgeleiteten Regressionskoeffizienten berechnet, zeigt sich nur eine eingeschränkte Korrelation mit der allgemeinen Bewertung des Störungsverhaltens durch die Probanden. Dies lässt auf nicht-lineare Zusammenhänge zwischen der Fahrzeugre-

---

aktion und der subjektiven Wahrnehmung des Fahrers im Bereich der Wahrnehmungsschwellen schließen. Aus den aufgezeigten Untersuchungsergebnissen des Störungsverhaltens von Personenkraftwagen wird eine Empfehlung zur Auslegung des Seitenwindverhaltens bei einer instationären Böenanregung in der frühen Phase der Fahrzeugentwicklung abgeleitet.

Auf Basis der erarbeiteten Ergebnisse wären weiterführende Untersuchungen des Seitenwindverhaltens von Personenkraftwagen bei instationärer Anregung vorstellbar. Dabei gilt es vor allem, die Objektivierung des Führungsverhaltens voranzutreiben, um dadurch einen simulativen Ansatz zur Grundauslegung zu definieren. Gerade die Bewertung der Fahrzeugrückmeldung über das Lenkgefühl beim Anlenken unter aerodynamischen Einflüssen beziehungsweise das Lenkgefühl bei Ausregelung einer Spurabweichung unter Seitenwind stellt weiterhin eine Herausforderung des praktischen Fahrversuchs dar.

Zudem wäre der Regelkreis zwischen aerodynamischer Anregung und Fahrzeugreaktion genauer zu betrachten. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden die aerodynamischen Anregungen durch explizit vorgegebene Kraft- und Momentenverläufe auf das Fahrzeug aufgebracht. Dabei gilt es zu prüfen, ob die hierbei aufgezeigten Abhängigkeiten auf eine gekoppelte, simulative Betrachtung der instationären, aerodynamischen Anregung und der resultierenden Fahrzeugreaktion übertragbar sind. Dazu gilt es eine gekoppelte Simulation der Fahrzeugumströmung und der Fahrzeugreaktion zu realisieren. Vor allem die Gegenüberstellung der quantifizierten Stellhebel wäre bei einer derartigen Betrachtung zu plausibilisieren. Zudem wäre zu prüfen, ob die hier aufgezeigten Abhängigkeiten der Fahrzeugantwort von Charakteristika instationärer Seitenwindböen auf instationäre Effekte bei Überholvorgängen oder Vorbeifahrten übertragbar sind.

Bei der Untersuchung der Einflussgröße der Fahrzeuggene und Fahrwerksparameter wäre eine detaillierte Untersuchung kombinierter Parameteränderungen auf die Fahrzeugreaktion unter Seitenwind denkbar. In vorliegender Arbeit wurden nur Einflüsse ausgewählter, multi-variater Änderungen betrachtet. Die daraus resultierenden, äußerst umfangreichen und voraussichtlich komplexen Erkenntnisse zu den Zusammenhängen der Einflussgröße kombinierter Parametervariationen wären für die Handhabung in einem effizienten Grundauslegungsprozess nur bedingt zielführend. Hierbei ist eine bedarfsgerechte Durchführung einer numerischen Gesamtfahrzeugsimulation mit dem zu betrachtenden Parametersatz leichter handhabbar. Im Rahmen der Untersuchung der Einflussgröße der Fahrwerksparameter wird in der vorliegenden Arbeit nur das Seitenwindverhalten betrachtet. Die Wirksamkeit der Stellhebel müsste darüberhinaus in Abhängigkeit des Einflusses auf andere Fahrdynamikeigenschaften untersucht werden. Hierbei gilt es, die Zielkonflikte der Fahrzeugauslegung bei der Ausprägung der Fahrwerksparameter gesamthaft zu berücksichtigen.

Ergänzend zu den quantifizierten Einflussgrößen der Parameter des passiven Fahrwerks, ist der Einfluss aktiver Systeme, vor allem der Parameter der Regelungslogik, auf das Fahrzeugverhalten bei kleinen aerodynamischen Anregungen zu betrachten und zu quantifizieren. Die Wirksamkeit aktiver Regelungssysteme im Zusammenspiel mit der Ausprägung der Fahrzeug- und Fahrwerksarchitekturen auf das Antwortverhalten bei instationären, vergleichsweise kleinen aerodynamischen Anregungen wäre dabei besonders zu untersuchen. Darüberhinaus sind die Einflüsse instationärer Anregungen mit dem regelnden Einfluss des Fahrers zu bewerten.

Wie in Abschnitt 7 aufgezeigt, ist über lineare Ansätze ein Bewertungsmaß zur absoluten Bewertung des Störungsverhaltens im Bereich der Wahrnehmungsschwellen nicht abzuleiten. Ob eine Objektivierung der absoluten Bewertung des Störungsverhaltens generisch möglich ist, bleibt offen. Die absolute Bewertung der subjektiven Wahrnehmung des Störungsverhaltens, und somit die resultierenden Kombinationen der Bewegungsverläufe, kann hierbei auch fahrerabhängig sein. Um gegebenenfalls eine Generik zur Bewertung von Fahrzeugreaktionen unter Seitenwind im Bereich der Wahrnehmungsschwellen abzuleiten, sind umfangreichere Probandenstudien für Kombinationen der Fahrzeugreaktionen entsprechend des in der Arbeit aufgezeigten Ansatzes zu realisieren.

Besteht hierbei eine Korrelation der Kenngrößen der Fahrzeugreaktion mit einer BI-Skala nach [61], so können aus den Simulationsergebnissen absolute Bewertungen zur subjektiven Wahrnehmung des Störungsverhaltens unter Seitenwind abgeleitet werden. Dadurch kann der Aufwand des Fahrsimulators in der frühen Phase der Fahrzeugentwicklung zur Absicherung des Störungsverhaltens vermieden werden. Da die Akustik der Umströmung von Personenkraftwagen einen signifikanten Einfluss auf den Komfort des Fahrers hat, wäre hierbei eine Betrachtung der Einflussgröße der auditiven Wahrnehmung aerodynamischer Störgrößen auf die subjektive Wahrnehmung des Seitenwindverhaltens von Personenkraftwagen empfehlenswert.

# A. Anhang

## A.1. Signalanalyse

Berechnung der diskreten Fouriertransformation DFT zur Spektralanalyse eines Schwingungssignals nach A.1 mit  $x = (x_0, \dots, x_{N-1}) \in \mathbb{C}^N$

$$f_k = \frac{1}{N} \sum_{v=0}^{N-1} x_k e^{-2\pi i \frac{vk}{N}}, k = 0, \dots, N-1 \quad (\text{A.1})$$

Berechnung der schnellen Fouriertransformation FFT zur Spektralanalyse eines Schwingungssignals nach A.1 mit  $N = 2n$

$$f_k = \begin{cases} f'_k + e^{-\frac{\pi i}{n} v} f''_k & \text{falls } k < N \\ f'_{k-n} + e^{-\frac{\pi i}{n} (k-n)} f''_{k-n} & \text{falls } k \geq N \end{cases}$$

Aus Messergebnissen kann das Kreuzspektrum (A.2) und das Autospektrum (A.3) der Eingangsgröße X und Ausgangsgröße Y nach [144] bestimmt werden.

$$G_{XY} = \sum_{i=1}^n X_i X_i \quad (\text{A.2})$$

$$G_{XX} = \sum_{i=1}^n |X_i|^2 \quad (\text{A.3})$$

Zur Filterung etwaiger Störgrößen wird die Übertragungsfunktion TF (A.4) einer Messreihe aus dem Quotienten des Kreuzspektrums und des Autospektrums berechnet.

$$H_{XY} = \frac{G_{XY}}{G_{XX}} \quad (\text{A.4})$$

Die Kohärenz der Eingangsgröße X und Ausgangsgröße Y wird dabei im Frequenzbereich nach Gleichung (A.5) bestimmt.

$$\gamma_{XY}^2 = \frac{|\langle G_{XY} \rangle|^2}{\langle G_{XX} \rangle \langle G_{YY} \rangle} \quad (\text{A.5})$$

## A.2. Stochastik

Im Folgenden werden die Berechnungen zur Stochastik nach [19] und [30] erläutert. Der Median einer nach dem Rang geordneten Messreihe  $x$  wird nach A.2 bestimmt.

$$\tilde{x} = \begin{cases} x_{\frac{n+1}{2}} & n \text{ ist ungerade} \\ \frac{1}{2} (x_{\frac{n}{2}} + x_{\frac{n}{2}+1}) & n \text{ ist gerade} \end{cases}$$

Das arithmetische Mittel  $\bar{x}$  und  $\bar{y}$  der Messreihe  $x$  und  $y$  wird nach (A.6) und (A.7) bestimmt.

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x \quad (\text{A.6})$$

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y \quad (\text{A.7})$$

Zur Abschätzung der Steigung eines linearen Zusammenhangs einer Messreihe  $x$  und Messreihe  $y$  wird der Regressionskoeffizient  $\beta_x$  für  $x$  nach A.8 ermittelt.

$$\beta_x = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{A.8})$$

Um den Grad der Streuung einer Messreihe  $x$  festzustellen, wird die Standardabweichung nach A.9 berechnet.

$$s_x = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (\text{A.9})$$

Zur Untersuchen einer etwaigen Abhängigkeit zweier Messreihen  $x$  und  $y$  wird eine Korrelationsanalyse durchgeführt. Um lineare Abhängigkeiten der beiden Messreihen festzustellen, wird die empirische Pearsonkorrelation nach folgender Gleichung A.10 berechnet.

$$Kor_e(x, y) = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (\text{A.10})$$

Durch die Berechnung eines Konfidenzniveaus mittels der Studentschen t-Verteilung nach Gleichung A.11 lässt sich die Signifikanz und somit Robustheit der berechneten Pearsonkorrelation überprüfen.

$$t = |Kor_e(x, y)| \sqrt{\frac{n-2}{1 - Kor_e(x, y)^2}} \quad (\text{A.11})$$

Die Anzahl der Freiheitsgrade  $v$  bestimmt sich aus dem Stichprobenumfang  $n$  nach A.12

$$v = n - 1 \quad (\text{A.12})$$

Das Konfidenzniveau bestimmt sich über die Wahrscheinlichkeit  $P$  mit dem Signifikanzniveau  $\alpha$  nach A.13.

$$P = 1 - \alpha \quad (\text{A.13})$$

Für das Konfidenzniveau eines zweiseitigen Vertrauensbereichs  $P_{zw}$  und die Freiheitsgrade  $v$  sind in Tabelle A.1 die Werte der zugehörigen t-Quantile nach [30] aufgetragen.

<b>Anzahl Freiheitsgrade <math>v</math></b>	<b>0.80</b>	<b>0.90</b>	<b>0.95</b>	<b>0.975</b>	<b>0.99</b>	<b>0.995</b>	<b>0.999</b>
1	1.376	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	318.309
2	1.061	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	22.327
3	0.978	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	10.215
4	0.941	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	7.173
5	0.920	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	5.893
6	0.906	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	5.208
7	0.896	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.785
8	0.889	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	4.501
9	0.883	1.383	1.812	2.262	2.821	3.250	4.297
10	0.879	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	4.144
11	0.876	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	4.025
12	0.873	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.930
13	0.870	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.852
14	0.868	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.787
15	0.866	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.733
16	0.865	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.686
17	0.863	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.646
18	0.862	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.610
19	0.861	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.579
20	0.860	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.552

Tabelle A.1.: t-Quantile für einen zweiseitigen Vertrauensbereich für eine ausgewählte Anzahl an Freiheitsgraden nach [30]



# Literaturverzeichnis

- [1] AHMED, S. R. ; LÜHRMANN, L. : Numerische Verfahren. In: *Aerodynamik des Automobils*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag Wiesbaden, 2005, Kapitel 16, S. 985–1051
- [2] AMMON, D. : Herausforderung Fahrwerksystemtechnik. In: *chassis.tech 2009, Proceedings*, 2009
- [3] ANTOUN, R. ; HACKERT, P. ; O’S;LEARY, M. ; SITCHIN, A. : Vehicle Dynamic Handling Computer Simulation - Model Development, Correlation, and Application Using ADAMS. In: *SAE Technical Paper Series 860574* (1986), S. 3625 – 3634
- [4] ARGENTINI, T. ; OZKAN, E. ; ROCCHI, D. ; ROSA, L. ; ZASSO, A. : Cross-wind effects on a vehicle crossing the wake of a bridge pylon. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 99 (2011), S. 734–740
- [5] ARNOLD, M. ; BURGERMEISTER, B. ; FÜHRER, C. ; HIPPMANN ; RILL, G. : Numerical methods in vehicle system dynamics: state of the art and current developments. In: *Vehicle System Dynamics, Taylor & Francis* 49 (2011), Nr. 7, S. 1159 – 1207
- [6] ASCHWANDEN, P. ; MÜLLER, J. ; TRAVAGLIO, G. C. ; SCHÖNING, T. : The Influence of Motion Aerodynamics on the Simulation of Vehicle Dynamics. In: *SAE Technical Paper Series 2008-01-0657* (2008), S. 545–551
- [7] BECKER, K. (Hrsg.): *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen III - Korrelation zwischen objektiver Messung und subjektiver Beurteilung von Versuchsfahrzeugen und -komponenten*. Expert-Verlag Renningen, 2006
- [8] BECKER, K. (Hrsg.): *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen IV - Korrelation zwischen objektiver Messung und subjektiver Beurteilung in der Fahrzeugentwicklung*. Expert-Verlag Renningen, 2010
- [9] BMW GROUP (Hrsg.): *ISAR R2010a - Beschreibung der Gleichungen des Gesamtfahrzeugmodells*. München: BMW Group, 2013
- [10] BOADA, B. ; BOADA, M. J. L. ; DIAZ, V. : Yaw moment control for vehicle stability in a crosswind. In: *Int. J. of Vehicle Design* 39 (2005), Nr. 4, S. 331–348
- [11] BOADA, M. J. L. ; BOADA, A. B. L. M. B. L. Munoz ; DIAZ, V. : Integrated control of front-wheel steering and front braking forces on the basis of fuzzy logic. In: *Proc. IMechE Vol. 220 Part D: J. Automobile Engineering* 220 (2006), S. 253–266

- [12] BOTEV, S. : *Digitale Gesamtfahrzeugabstimmung für Ride und Handling*. Fortschritt-Berichte VDI. VDI-Verlag Düsseldorf, 2008 (Reihe 12: Verkehrstechnik/ Fahrzeugtechnik 684)
- [13] BRAESS, H.-H. : Kraftfahrzeugtechnische Methoden zur Untersuchung des Seitenwindverhaltens des Systems Fahrzeug - Fahrer. In: *Deutsche Kraftfahrtforschung und Straßenverkehrstechnik* Heft 193 (1968), S. 1–20
- [14] BRAESS, H.-H. : Untersuchung des Seitenwindverhaltens des Systems Fahrzeug - Fahrer. In: *Deutsche Kraftfahrtforschung und Straßenverkehrstechnik* Heft 206 (1970), S. 1–32
- [15] BRAESS, H.-H. (Hrsg.): *Vieweg-Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Vieweg + Teubner Verlag Wiesbaden, 2011
- [16] BRAESS, H.-H. ; BURST, H. ; HAMM, L. ; HANNES, R. : Verbesserung der Fahreigenschaften durch Verringerung des aerodynamischen Auftriebs. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 77 (1975), Nr. 4, S. 119–124
- [17] BRAESS, H.-H. (Hrsg.) ; SEIFFERT, U. (Hrsg.): *Automobildesign und Technik*. Bd. 1. Auflage. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag Wiesbaden, 2007
- [18] BRAND, W. : *Einsatz einer aktiven Lenkung zur Seitenwindkompensation*. fka, 2009 (Schriftenreihe Automobiltechnik 98)
- [19] BRONSTEIN, I. N. ; SEMENDJAJEW, K. A. ; MUSIOL, G. ; MÜHLIG, H. : *Taschenbuch der Mathematik*. Wissenschaftlicher Verlag Harri Deutschland GmbH, 2005
- [20] BRUZELIUS, F. ; UYSTEPRUYST, D. ; JACOBSON, B. ; KRAJNOVIC, S. : A simple real-time aerodynamic model for vehicles in overtaking situations. In: *Int. J. Vehicle Systems Modelling and Testing* 8 (2013), Nr. 3
- [21] BUCHHEIM, R. ; MARETZKE, J. ; PIATEK, R. : The Control of Aerodynamic Parameters Influencing Vehicle Dynamics. In: *SAE Technical Paper Series* 850279 (1985), S. 1–14
- [22] BUNDESMINISTERIUM FÜR VERKEHR, BAU UND STADTENTWICKLUNG (Hrsg.): *Mobilität in Deutschland 2008: Ergebnisbericht Struktur - Aufkommen - Emissionen - Trends*. Berlin: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2008
- [23] CHARUVISITA, S. ; KIMURAB, K. ; FUJINO, Y. : Experimental and semi-analytical studies on the aerodynamic forces acting on a vehicle passing through the wake of a bridge tower in cross wind. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 92 (2004), S. 749–780
- [24] CHOMETON, F. ; STRZELECKI, A. ; FERRAND, V. ; DECHIPRE, H. ; DUFOUR, P. C. ; GOHLKE, M. ; HERBERT, V. : Experimental Study of Unsteady Wakes Behind an Oscillating Car Model. In: *SAE Technical Paper Series* 2005-01-0604 (2005)
- [25] COGOTTI, A. : Generation of a Controlled Turbulent Flow in an Automotive Wind Tunnel and its Effect on Car Aerodynamics and Aeroacoustics. In: [178]

- [26] COGOTTI, A. : Evolution of performance of an automotive wind tunnel. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96 (2008), S. 667–700
- [27] COOPER, R. K.: Atmospheric turbulence with respect to moving ground vehicles. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 17 (1984), S. 215–238
- [28] COOPER, R. K. ; WATKINS, S. : The Unsteady Wind Environment of Road Vehicles, Part One: A Review of the On-road Turbulent Wind Environment. In: *SAE Technical Paper Series* 2007-01-1236 (2007), S. 1259–1276
- [29] CORIN, R. J. ; DOMINY, R. G.: A CFD investigation into the transient aerodynamic forces on overtaking road vehicle models. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 96 (2008), S. 1390– 1411
- [30] CRAMER, E. ; KAMPS, U. : *Grundlagen der Wahrscheinlichkeitsrechnung und Statistik: Ein Skript für Studierende der Informatik, der Ingenieur- und Wirtschaftswissenschaften.* Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2008
- [31] DAGDELENA, M. ; REYMONDA, G. ; KEMENYA, A. ; BORDIERB, M. ; MAÏZIB, N. : Model-based predictive motion cueing strategy for vehicle driving simulators. In: *Control Engineering Practice* 17 (2009), S. 995–1003
- [32] DECKER, M. : *Zur Beurteilung der Querdynamik von Personenkraftwagen,* Technische Universität München, Diss., 2009. <http://mediatum.ub.tum.de/node?id=674320>
- [33] DEMUTH, R. ; BUCK, P. : Numerical Investigations on the Unsteady Aerodynamics of Road Vehicles under Gusty Weather Conditions. In: *6th MIRA International Vehicle Aerodynamics Conference, 25-26 October 2006, Proceedings, 2006*
- [34] DEPPERMAN, K. H.: *Fahrversuche und Berechnungen zum Geradeauslauf von Personenkraftwagen.* Fortschritt-Berichte VDI. VDI-Verlag Düsseldorf, 1989 (Reihe 12: Verkehrstechnik/ Fahrzeugtechnik 133)
- [35] DETTKI, F. : *Methoden zur objektiven Bewertung des Geradeauslaufs von Personenkraftwagen,* Universität Stuttgart, Diss., 2005
- [36] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (Hrsg.): *DIN 70000: Fahrzeugdynamik und Fahrverhalten - Begriffe.* Berlin: Deutsches Institut für Normung e.V., 1991
- [37] DIBAA, F. ; BARARIA, A. ; ESMAILZADEHA, E. : Handling and safety enhancement of race cars using active aerodynamic systems. In: *Vehicle System Dynamics, Taylor & Francis* 52 (2014), Nr. 9, S. 1171–1190
- [38] DONISELLI, C. ; MASTINU, G. ; GOBBI, M. : Aerodynamic Effects on Ride Comfort and Road Holding of Automobiles. In: *Vehicle System Dynamics, Taylor & Francis* 25 (1996), Nr. 1, S. 99–125

- [39] DUELL, E. G. ; KHARAZI, A. ; MULLER, S. ; EBELING, W. ; MERCKER, E. : The BMW AVZ Wind Tunnel Center. In: *SAE Technical Paper Series* 2010-01-0118 (2010)
- [40] EHLICH, J. ; HEISSING, B. ; DÖDLBACHER, G. : Meßtechnische Untersuchung zum Geradeauslauf von Personenwagen. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 87 (1985), Nr. 6, S. 675 – 681
- [41] EINSLE, S. ; SCHÖPFEL, A. ; BEITELSCHMIDT, M. : Neue Ansätze der transienten Reifenseitenkraftmodellierung zur Verbesserung der Fahrdynamiksimulation. In: *Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau 2010, VDI-Bericht Nr. 2107*. VDI-Verlag Düsseldorf, 2010
- [42] ENGELS, A. : Geradeauslaufkriterien für PKW und deren Bewertung. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 97 (1985), Nr. 6, S. 384–391
- [43] FAVRE, T. : *Numerical Investigation of Unsteady Crosswind Aerodynamics for Ground Vehicles*, KTH Royal Institute of Technology, Diplomarbeit, 2009
- [44] FIALA, E. : Die Wechselwirkungen zwischen Fahrzeug und Fahrer. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 69 (1967), Nr. 10, S. 343–348
- [45] FIALA, E. : *Mensch und Fahrzeug, Fahrzeugführung und sanfte Technik*. Bd. 1. Auflage. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag Wiesbaden, 2006
- [46] FISCHER, A. : *Untersuchungen zur simulationsbasierten Grundausslegung von quer- und vertikaldynamischen Fahrzeugeigenschaften*, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2010
- [47] FISCHER, M. : *Motion-Cueing-Algorithmen für eine realitätsnahe Bewegungssimulation*, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Diss., 2009
- [48] FLEGL, H. ; RAUSER, M. ; WITTE, L. : Beeinflussung des Fahrverhalten durch die Aerodynamik. In: *Automobil-Industrie* 4 (1987), S. 304–318
- [49] FUJIIHASHI, K. ; OKUMURA, K. : Analysis of Vehicle Stability in Crosswinds. In: *SAE Technical Paper Series* 2000-05-0255 (2000)
- [50] GIPSER, M. : FTire: ein physikalisch basiertes, anwendungsorientiertes Reifenmodell für alle wichtigen fahrdynamischen Fragestellungen. In: *4.Darmstädter Reifenkolloquium, Darmstadt, S.42-68.*, 2002
- [51] GLASER, S. ; MAMMAR, S. ; DAKHALLAH, D. : Lateral wind force and torque estimation for a driving assistance. In: *Proceedings of the 17th World Congress, The International Federation of Automatic Control*, 2008
- [52] GNADLER, R. : Beitrag zum Problem Fahrer-Fahrzeug-Seitenwind. In: *Automobil-Industrie* 3 (1973), S. 1–33
- [53] GROSS, D. ; HAUGER, W. ; SCHRÖDER, J. ; WALL, W. A.: *Technische Mechanik 3: Kinetik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2012

- [54] GRUNOW, D. ; HEISSING, B. ; HINZE, P. : Fahrverhalten von PKW bei Seitenwind. In: *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* 23 (1985), Nr. 6, S. 169–174
- [55] GUILMINEAU, E. ; CHOMETON, F. : Numerical and Experimental Analysis of Unsteady Separated Flow behind an Oscillating Car Model. In: *SAE Technical Paper Series* 2008-01-0738 (2008), S. 1–10
- [56] GULDNER, J. ; BERKAN, D. ; KVASNICKA, P. ; KRIEBEL, S. ; SEDLMAYR, M. : Neue Arbeitsweisen in der Fahrdynamikentwicklung. In: *2. Internationales Münchner Fahrwerk-Symposium, Proceedings*, 2011
- [57] HANEY, D. : *Untersuchung des PKW-Seitenwindverhaltens bei dynamischer Anregung mit einem validierten MKS-Simulationsmodell*, Technische Universität Braunschweig, Diplomarbeit, 2001
- [58] HARADA, H. ; IWASAKI, T. : Stability Criteria and Objective Evaluation of a Driver-Vehicle System for Driving in Lane Change and against Crosswind. In: *Vehicle System Dynamics, Taylor & Francis* 23 (1994), Nr. 1, S. 197–208
- [59] HE, J. : *Lane Keeping under Cognitive Distractions: Performance and Mechanisms*, University of Illinois, Diss., 2012
- [60] HE, J. ; MCCARLEY, J. S. ; KRAMER, A. F.: Lane Keeping Under Cognitive Load Performance Changes and Mechanisms. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 56 (2014), Nr. 2, S. 414–426
- [61] HEISSING, B. ; BRANDL, H. J.: *Subjektive Beurteilung des Fahrverhaltens*. Vogel Buchverlag, Würzburg, 2002
- [62] HEMON, P. : On the transient response of road vehicles to cross-wind gust. In: NAPIRSTEK, J. (Hrsg.) ; FISCHER, C. (Hrsg.): *EACWE4 — The Fourth European & African Conference on Wind Engineering, Proceedings*, 2005
- [63] HESS, R. : *Entwicklung eines Beurteilungsverfahrens zur Quantifizierung des Seitenwindverhaltens*, Technische Universität Dresden, Diplomarbeit, 2013
- [64] HOLDMANN, P. ; KOEHN, P. ; AMMON, D. : Das Einlaufverhalten von Reifen in unterschiedlichen Betriebssituationen und seine Relevanz für die Gesamtfahrzeugdynamik. In: *VDI-Bericht Nr. 1494*. VDI-Verlag Düsseldorf, 1999
- [65] HOWELL, J. : Real Environment for Vehicles on the Road. In: WIEDEMANN, J. (Hrsg.) ; HUCHO, W. H. (Hrsg.): *Progress in Vehicle Aerodynamics - Advanced Experimental Techniques*. Expert-Verlag Renningen, 2000
- [66] HOWELL, J. : Unsteady Aerodynamic Loads on a Road Vehicle in Windy Conditions. In: [178]
- [67] HOWELL, J. ; GARRY, K. ; HOLT, J. : The Aerodynamics of a Small Car Overtaking a Truck. In: *SAE Technical Paper Series* 2014-01-0604 (2014)

- [68] HOWELL, J. ; LE GOOD, G. : The Influence of Aerodynamic Lift on High Speed Stability. In: *SAE Technical Paper Series 1999-01-0651* (1999), S. 1008–1015
- [69] HUCHO, W. H.: Unsteady Flow Effects in Vehicle Aerodynamics - Occasional Observations and Distinction of the Phenomena. In: [178]
- [70] HUCHO, W. H.: Windkanäle. In: *Aerodynamik des Automobils*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag Wiesbaden, 2005, Kapitel 14, S. 807–907
- [71] HUEMER, J. ; MÄDER, D. ; RÖSKI, K. : Methode zur simulativen Einflussanalyse von Fahrwerkparametern auf das Fahrverhalten von Kraftfahrzeugen am Beispiel des Seitenwindverhaltens. In: *2. Internationales Münchner Fahrwerk-Symposium, Proceedings*, 2011
- [72] HUEMER, J. ; STICKEL, T. ; SAGAN, E. ; SCHWARZ, M. ; WALL, W. A.: Influence of unsteady aerodynamics on driving dynamics. In: *Vehicle System Dynamics, Taylor & Francis 52* (2014), Nr. 11, S. 1470–1488
- [73] HUSSAIN, K. ; RAHNEJAT, H. ; HEGAZY, S. : Transient vehicle handling analysis with aerodynamic interactions. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics 221* (2007), S. 21–32
- [74] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (Hrsg.): *ISO 12021-1: Road vehicles - Sensitivity to Lateral Wind: Open-Loop Test Method using Wind Generator Input*. Geneve: International Organization for Standardization, 1996
- [75] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (Hrsg.): *ISO 2631-1, Mechanical vibration and shock –Evaluation of human exposure to whole-body vibration – Part 1 General requirements*. Geneve: International Organization for Standardization, 1996
- [76] ISERMANN, R. : *Mechatronische Systeme - Grundlagen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2008
- [77] ITO, K. ; FUJISHIRO, T. ; KANAI, K. ; OCHI, Y. : Stability Analysis of Automatic Lateral Motion Controlled Vehicle with Four Wheel Steering System. In: *American Control Conference, 1990*, 1990
- [78] JIAO, H. Y. ; ZHANG, K. ; LI, Y. ; LIU, H. : Simulation Analysis of Vehicle Crosswind Stability in ADAMS/CAR. In: *Applied Mechanics and Materials 182 - 183* (2012), S. 885
- [79] KAHVECI, N. E.: Adaptive Steering Control for Uncertain Vehicle Dynamics with Crosswind Effects and Steering Angle Constraints. In: *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Vehicular Electronics and Safety*, 2008
- [80] KAMM, W. ; H., H. ; NIEMANN, K. ; BLIESKE, H. : Modellversuche und Berechnungen über die Richtungshaltung von Kraftfahrzeugen. In: *Deutsche Kraftfahrtforschung und Straßenverkehrstechnik Heft 164* (1963), S. 5–49

- [81] KANDASAMY, S. ; DUNCAN, B. ; GAU, H. ; MAROY, F. ; BELANGER, A. ; GRUEN, N. ; SCHAEUFELE, S. : Aerodynamic Performance Assessment of BMW Validation Models using Computational Fluid Dynamics. In: *SAE Technical Paper Series 2012-01-0297* (2012)
- [82] KAWAMURA, T. ; OGAWA, A. : Effect of Unsteady Lift Force on Vehicle Dynamics in Heave and Pitch Motion. In: *SAE Technical Paper Series 2014-01-0576* (2014)
- [83] KIM, K. ; KIM, B. ; GO, Y. ; PARK, J. ; PARK, J. ; SUH, I. ; YIA, K. : An investigation on motor-driven power steering-based crosswind disturbance compensation for the reduction of driver steering effort. In: *Vehicle System Dynamics, Taylor & Francis 52* (2014), Nr. 7, S. 922–947
- [84] KNAUER, P. : *Objektivierung des Schwingungskomforts bei instationärer Fahrbahnregung*, Technische Universität München, Diss., 2010
- [85] KNÖRNSCHILD, U. : Influence of Unsteady Pitch Angle Changes on a Race Car. In: [178]
- [86] KOBAYASHI, T. ; KITO, K. : Cross-wind effects and the dynamics of light cars. In: *Int. J. of Vehicle Design 3* (1983), S. 142–157
- [87] KOBETZ, C. : *Modellbasierte Fahrdynamikanalyse durch ein an Fahrmanövern parameteridentifiziertes querdynamisches Simulationsmodell*, Technische Universität Wien, Diss., 2003
- [88] KRAJNOVIC, S. ; BENGTSSON, A. ; DAVIDSON, L. ; BASARA, B. : Numerical Study of Crosswind Stability of a Simplified Car at Gusty Wind. In: *8th MIRA International Vehicle Aerodynamics Conference*, 2010
- [89] KRANTZ, W. : *An Advanced Approach for Predicting and Assessing the Driver's Response to Natural Crosswind*. Expert-Verlag Renningen, 2012
- [90] KRANTZ, W. ; PITZ, J.-O. ; STOLL, D. ; NGUYEN, M.-T. : Simulation des Fahrens unter instationärem Seitenwind. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift 2* (2014), Nr. 2, S. 64–68
- [91] KRANTZ, W. ; SCHRÖCK, D. ; NEUBECK, J. ; WIEDEMANN, J. ; LANZILOTTA, E. : An Enhanced Single Track Model for Evaluation of the Driver-Vehicle Interaction under Crosswind. In: *9th Stuttgart International Symposium - Automotive and Engine Technology, Proceedings Bd. 1*, 2009, S. 273–288
- [92] KRÜGER, L. ; LENTZEN, M. : Richtungsstabilität. In: *Aerodynamik des Automobils*. Friedr. Vieweg & Sohn Verlag Wiesbaden, 2005, Kapitel 5, S. 285–371
- [93] KUDRITZKI, D. : *Zum Einfluss querdynamischer Bewegungsgrößen auf die Beurteilung des Fahrverhaltens*. Fortschritt-Berichte VDI. VDI-Verlag Düsseldorf, 1989 (Reihe 12: Verkehrstechnik/ Fahrzeugtechnik 132)

- [94] KVASNICKA, P. ; PROKOP, G. ; DÖRLE, M. ; RETTINGER, A. ; STAHL, H. : Durchgängige Simulationsumgebung zur Entwicklung und Absicherung von Fahrdynamischen Regelsystemen. In: *Berechnung und Simulation im Fahrzeugbau, Proceedings* Bd. VDI-Bericht Nr. 1967, VDI-Verlag Düsseldorf, 2006, S. 387–403
- [95] LAUBER, L. : *Geradeausverhalten in Abhängigkeit von den Auftriebsbeiwerten und dem Giermomentenbeiwert*, Fachhochschule München, Diplomarbeit, 2014
- [96] LEMKE, T. : *Untersuchung der Fahrzeugumströmung bei Seitenwind für die Frühphase der Pkw-Entwicklung*, Universität Siegen, Diss., 2006
- [97] LENNERT, S. : *Zur Objektivierung von Schwingungskomfort in Personenkraftwagen*. VDI-Verlag Düsseldorf, 2009 (Reihe 12 Nr. 698)
- [98] MACADAM, C. C.: Static Turning Analysis of Vehicles Subject to Externally Applied Forces - A Moment Arm Ratio Formulation. In: *Vehicle System Dynamics, Taylor & Francis* 18 (1989), Nr. 6, S. 345 – 357
- [99] MACADAM, C. C. ; SAYERS, M. W. ; POINTER, J. D. ; GLEASON, M. : Crosswind Sensitivity of Passenger Cars and the Influence of Chassis and Aerodynamic Properties on Driver Preferences. In: *Vehicle System Dynamics, Taylor & Francis* 19 (1990), Nr. 1, S. 201–236
- [100] MACK, G. : *Eine neue Methodik zur modellbasierten Bestimmung dynamischer Betriebslasten im mechatronischen Fahrwerkentwicklungsprozess*, Universität Karlsruhe (TH), Diss., 2009
- [101] MAEDA, K. ; SAKAI, H. ; TOMIYAMA, M. : Analysis of Aerodynamic Effects on the Vehicle Stability in High Speed Running. In: *The 8th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC 1996), Proceedings*, 1996
- [102] MAEDER, D. ; ROEKSI, K. : Wissensrepräsentation und algorithmische Analyse von Erfahrungswissen im Bereich der Fahrdynamikentwicklung. In: *16. Kongress zur Berechnung, Simulation und Erprobung im Fahrzeugbau - Simvec, Baden-Baden*. Baden-Baden, 2012
- [103] MARETZKE, B. J. und R. J. und Richter: Einfluss der Aerodynamik auf die Richtungsstabilität von PKW. In: *VDI-Bericht Nr. 546*. VDI-Verlag Düsseldorf, 1984, S. 101–116
- [104] MARUYAMA, Y. ; YAMAZAKI, F. : Driving simulator experiment on the moving stability of an automobile under strong crosswind. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 94 (2006), S. 191–205
- [105] MCGILL, R. ; TUKEY, J. W. ; LARSEN, W. A.: Variations of Boxplots. In: *The American Statistician* 32 (1978), S. 12–16
- [106] MCRUER, D. T. ; ALLEN, R. W. ; WEIR, D. H. ; KLEIN, R. H.: New Results in Driver Steering Control Models. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 19 (1977), S. 367–397

- [107] MÄDER, D. : *Simulationsbasierte Grundausslegung der Fahrzeug-Querdynamik unter Berücksichtigung von Erfahrungswissen in der Fahrdynamikentwicklung*, Technische Universität Kaiserslautern, Verlag Dr. Hut, München, 2012
- [108] MEDER, J. ; WIEGAND, T. ; PFADENHAUER, M. : Adaptive Aerodynamik des neuen Porsche 911 Turbo. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 2 (2014), Nr. 2, S. 58–63
- [109] MEINKE, I. ; GERSTNER, E. ; STORCH, H. von ; MARX, A. ; SCHIPPER, H. ; KOTTMEIER, C. ; TREFFEISEN, R. ; LEMKE, P. : Regionaler Klimaatlas Deutschland der Helmholtz-Gemeinschaft informiert im Internet über möglichen künftigen Klimawandel. In: *Mitteilungen DMG 02/2010* (2010), S. 5 – 7
- [110] MILLIKAN, W. F. ; DELL'AMICO, F. ; RICE, R. S.: The Static Directional Stability and Control of an Automobile. In: *SAE Technical Paper Series 760712* (1976), S. 2216–2277
- [111] MITSCH, J. : Das Verhalten des Kraftfahrzeuglenkers bei Seitenwind. In: *Österreichische Ingenieur-Zeitschrift* 131 (1986), Nr. 11-12, S. 462 – 468
- [112] MITSCHKE, M. ; SAGAN, E. : *Fahrdynamik von Pkw-Wohnanhängerzügen*. Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, 1988
- [113] MITSCHKE, M. ; WALLENTOWITZ, H. : *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. Bd. 4. Auflage. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2004
- [114] MIZUGUCHI, M. ; CHIKAMORI, S. ; TAKADA, H. : Study on the Response of Automobiles against Side Wind Using Model and Wind Tunnel. In: *Mitsubishi Heavy Industries Ltd. - Technical Review* (1977), S. 344–351
- [115] MSC SOFTWARE CORPORATION (Hrsg.): *MD ADAMS/CAR 2011® Manual*. Newport Beach: MSC Software Corporation, 2011
- [116] MURAGISHI, Y. ; FUKUI, K. ; ASAGA, Y. ; ONO, E. ; YAMAMOTO, Y. ; KATSUYAMA, E. ; SAKAI, H. : Enhancement of Vehicle Dynamic Behavior Based on Visual and Motion Sensitivity - Development of Human Sensitivity Evaluation System. In: *The 8th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC 2006), Proceedings*, 2006
- [117] NEGELE, J. : *Anwendungsgerechte Konzipierung von Fahrsimulatoren für die Fahrzeugentwicklung*, Technische Universität München, Diss., 2007
- [118] NEGRUT, D. ; OTTARSSON, G. ; BELCZYNSKI, M. ; CORCORAN, C. : Improved Simulation of Models with Complex User-Subroutines in MSC.ADAMS. In: *SAE Technical Paper Series 2006-01-0158* (2006)
- [119] NEUKUM, A. ; KRÜGER, H.-P. ; SCHULLER, J. : Der Fahrer als Messinstrument für fahrdynamische Eigenschaften? In: *Der Fahrer im 21. Jahrhundert* Bd. VDI-Bericht Nr. 1613, VD, 2001
- [120] NEUKUM, A. ; PAULIG, J. ; FRÖMMIG, L. ; HENZE, R. : Untersuchung zur Wahrnehmung von Lenkmomenten bei Pkw / Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT). 2009 (Schriftenreihe Nr. 91). – Forschungsbericht

- [121] NOGER, C. ; REGARDIN, C. ; SZE'CHE'NYI, E. : Investigation of the transient aerodynamic phenomena associated with passing manoeuvres. In: *Journal of Fluids and Structures* 21 (2005), S. 231–241
- [122] NOGUCHI, H. : An analysis of vehicle behaviour in a cross wind. In: *Int. J. of Vehicle Design Special Issue on Vehicle Safety* (1986), S. 304–317
- [123] OKUMURA, K. ; KURIYAMA, T. : Transient Aerodynamic Simulation in Crosswind and Passing an Automobile. In: *SAE Technical Paper Series* 970404 (1997), S. 647–662
- [124] ORABY, W. A. ; CROLLA, D. A.: Passenger Car Stability under Random Wind Excitation. In: *SAE Technical Paper Series* 2001-01-0133 SP-1602 (2001), S. 1–10
- [125] PACEJKA, H. B.: *Tyre and Vehicle Dynamics*. 2. Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2006
- [126] PASSMORE, M. A. ; RICHARDSON, S. ; IMAM, A. : An experimental study of unsteady vehicle aerodynamics. In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 215 (2001), S. 779 – 788
- [127] PFEFFER, P. : *Interaction of Vehicle and Steering System Regarding On-Centre Handling*, University of Bath, Diss., 2006
- [128] PFEFFER, P. (Hrsg.) ; HARRER, M. (Hrsg.): *Lenkungsbandbuch - Lenksysteme, Lenkgefühl, Fahrdynamik von Kraftfahrzeugen*. Vieweg + Teubner Verlag Wiesbaden, 2011
- [129] PFEIFFER, J. ; KING, R. : Linear parameter-varying active flow control for a 3D bluff body exposed to cross-wind gusts. In: *American Institute of Aeronautics and Astronautics* (2014)
- [130] POTTHOFF, J. ; SCHMID, I. C.: *Wunibald I. E. Kamm - Wegbereiter der modernen Kraftfahrtechnik*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2012
- [131] RAUH, J. ; AMMON, D. : System dynamics of electrified vehicles: some facts, thoughts, and challenges. In: *Vehicle System Dynamics, Taylor & Francis* 49 (2011), Nr. 7, S. 1005 – 1020
- [132] RIEKERT, P. ; SCHUNCK, T. E.: Zur Fahrmechanik des gummbereiften Kraftfahrzeugs. In: *Ingenieur-Archiv XI, Stuttgart* (1940), S. 210 – 224
- [133] ROCCHI, D. ; ROSA, L. ; SABBIONI, E. ; SBROSI, M. ; BELLOLI, M. : A numerical–experimental methodology for simulating the aerodynamic forces acting on a moving vehicle passing through the wake of a bridge tower under crosswind. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 104-106 (2012), S. 256–265
- [134] ROMPE, K. ; HEISSING, B. : *Objektive Testverfahren für die Fahreigenschaften von Kraftfahrzeugen*. TÜV Rheinland Köln, 1984
- [135] SABBIONI, E. ; SBROSI, M. ; ROCCHI, D. ; GALEOTTI, R. : Dynamic Response of Vehicle-Driver Couple to the Aerodynamic Loads due to the Crossing of a Bridge Tower Wake. In: *SAE Technical Paper Series* 2012-01-0214 (2012)

- [136] SACKMANN, M. ; TRÄCHLTER, A. : Nichtlineare Fahrdynamikregelung mit einer aktiven Vorderachslenkung zur Verbesserung des Seitenwindverhaltens. In: *at – Automatisierungstechnik, Oldenbourg Wissenschaftsverlag* 51 (2003), Nr. 12, S. 535 – 546
- [137] SAMMET, T. : *Motion-Cueing-Algorithmen für die Fahrsimulation*. Fortschritt-Berichte VDI. VDI-Verlag Düsseldorf, 2007 (Reihe 12: Verkehrstechnik/ Fahrzeugtechnik 643)
- [138] SCHAIBLE, S. : *Fahrzeugseitenwindempfindlichkeit unter natürlichen Bedingungen*, Rheinisch-Westfälisch Technische Hochschule Aachen, Diss., 1998
- [139] SCHRAMM, D. ; HILLER, M. ; BARDINI, R. : *Modellbildung und Simulation der Dynamik von Kraftfahrzeugen*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2010
- [140] SCHRÖCK, D. ; KRANTZ, W. ; WIDDECKE, N. ; WIEDEMANN, J. : Instationäre aerodynamische Eigenschaften von Fahrzeugen unter böigem Seitenwind. In: *Tagung Fahrzeug-Aerodynamik" Haus der Technik München, Proceedings*, 2010
- [141] SCHREFL, M. : *Instationäre Aerodynamik von Kraftfahrzeugen: Aerodynamik bei Überholvorgang und böigem Seiten*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2008
- [142] SCHRÖCK, D. ; WIDDECKE, N. ; WIEDEMANN, J. : Aerodynamic Response of a Vehicle Model to Turbulent Wind. In: *9th Stuttgart International Symposium - Automotive and Engine Technology, Proceedings*, 2009
- [143] SCHRÖCK, D. ; WIDDECKE, N. ; WIEDEMANN, J. : The Effect of High Turbulence Intensities on Surface Pressure Fluctuations and Wake Structures of a Vehicle Model. In: *SAE Technical Paper Series 2009-01-0001* (2009), S. 1–13
- [144] SCHRÜFER, E. : *Signalverarbeitung: Numerische Verarbeitung digitaler Signale*. Carl Hanser Verlag, München, 1992
- [145] SCHUDY, J. : *Validierung eines virtuellen Fahrzeugmodells*, Technische Universität München, Diplomarbeit, 2004
- [146] SCHÄUFELE, S. : *Validierung der neuen Windkanäle im Aerodynamischen Versuchszentrum der BMW Group und Analyse der Übertragbarkeit der Ergebnisse*, Karlsruher Institut für Technologie, Diss., 2010
- [147] SCHÜTZ, T. : CFD Validation Progress in Vehicle Aerodynamics Development at Audi. In: *11th Stuttgart International Symposium - Automotive and Engine Technology, Proceedings* Bd. 1, 2011
- [148] SMILEY, A. ; REID, L. ; FRASER, M. : Changes in Driver Steering Control With Learning. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 22 (1980), S. 401–415
- [149] SORGATZ, U. : *Ein theoretisches Fahrzeugmodell zur Abbildung der Fahrdynamik bis in den Grenzbereich*, Rheinisch-Westfälisch Technische Hochschule Aachen, Diss., 1973

- [150] SORGATZ, U. ; THOMAS, H. : Entwurfskriterien zur Bahnstabilität von Personenkraftwagen. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 86 (1984), Nr. 2, S. 71–74
- [151] STAMER, N. : *Ermittlung optimaler PKW-Querdynamik und ihre Realisierung durch Allradlenkung*. Fortschritt-Berichte VDI. VDI-Verlag Düsseldorf, 1997 (Reihe 12: Verkehrstechnik/ Fahrzeugtechnik 302)
- [152] STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): *Verkehr - Verkehrsunfälle 2008, Fachserie 8 Reihe 7*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2009
- [153] STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): *Verkehr - Verkehrsunfälle 2009, Fachserie 8 Reihe 7*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2010
- [154] STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): *Verkehr - Verkehrsunfälle 2010, Fachserie 8 Reihe 7*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2011
- [155] STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): *Verkehr - Verkehrsunfälle 2011, Fachserie 8 Reihe 7*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2012
- [156] STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.): *Verkehr - Verkehrsunfälle 2012, Fachserie 8 Reihe 7*. Wiesbaden: Statistisches Bundesamt, 2013
- [157] STOCK, G. ; HOFFMANN, J. ; KÜCÜKAY, F. ; HENZE, R. : Sensitivität des Durchschnittsfahrers auf Veränderungen in der Fahrdynamik. In: *Subjektive Fahreindrücke sichtbar machen IV - Korrelation zwischen objektiver Messung und subjektiver Beurteilung in der Fahrzeugentwicklung*. Expert-Verlag Renningen, 2010, Kapitel 14, S. 179–197
- [158] TAKANAMI, K. ; SAKAI, T. ; MATSUSHITA, A. : Measurement of transient aerodynamic forces and some consideration of their effects when a vehicle passes side wind blower. In: *Transactions of the Society of Automotive Engineers of Japan* 6 (1973), S. 83–91
- [159] TANIGUCHI, H. ; KIMURA, T. ; TAKEDA, Y. ; SUZUKI, T. ; KANEKO, A. ; JINBO, T. : Independent Control of Steering Force and Wheel Angles to Improve Straight Line Stability. In: *SAE Technical Paper Series* 2014-01-0065 (2014)
- [160] THEISSEN, P. : *Unsteady Vehicle Aerodynamics in Gusty Crosswind*, Technische Universität München, Diss., 2012.  
<http://mediatum.ub.tum.de/node?id=1096026>
- [161] THEISSEN, P. ; DEMUTH, R. ; ADAMS, N. A.: Unsteady phenomena in vehicle aerodynamics under time-dependent flow conditions. In: *10th Stuttgart International Symposium - Automotive and Engine Technology, Proceedings*, 2010
- [162] THEISSEN, P. ; WOJCIAK, J. ; HEULER, K. ; DEMUTH, R. ; INDINGER, T. ; ADAMS, N. A.: Experimental Investigation of Unsteady Vehicle Aerodynamics under Time-Dependent Flow Conditions - Part 1. In: *SAE Technical Paper Series* 2011-01-0177 (2011)
- [163] THEISSEN, P. ; WOJCIAK, J. ; HEULER, K. ; DEMUTH, R. ; INDINGER, T. ; ADAMS, N. A.: Experimental Investigation of Unsteady Vehicle Aerodynamics under Time-Dependent Flow Conditions - Part 2. In: *SAE Technical Paper Series* 2011-01-0164 (2011)

- [164] TRAN, V. T.: Determining the Wind Forces and Moments Acting on Vehicles by Means of Pressure Sensors. In: *SAE Technical Paper Series* 900313 (1990), S. 421–432
- [165] TRAN, V. T.: Crosswind Feedforward Control - A Measure to Improve Vehicle Crosswind Behaviour. In: *Vehicle System Dynamics, Taylor & Francis* 23 (1994), Nr. 1, S. 165 – 209
- [166] TRAUTVETTER, P. : *Vermessung der Seitenwindanlage des Messgeländes in Aschheim*, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Diplomarbeit, 2010
- [167] TSUBOKURA, M. ; CHENG, S. ; NAKASHIMA, T. ; NOUZAWA, T. ; NAKAMURA, T. : Large-Eddy Simulation of the Aerodynamic Pitching Stability of Road Vehicle. In: PEREIRA, J. C. F. (Hrsg.) ; SEQUEIRA, A. (Hrsg.): *ECCOMAS CFD, Proceedings*, 2010
- [168] TSUBOKURA, M. ; KOBAYASHI, T. ; NAKASHIMA, T. ; NOUZAWA, T. T. N. T. Nakamura ; ZHANG, H. ; ONISHI, K. ; OSHIMA, N. : Computational visualization of unsteady flow around vehicles using high performance computing. In: *Computers & Fluids* 38 (2009), S. 981 – 990
- [169] TSUCHIYA, S. ; HARADA, H. ; WATARI, A. : Some experimental and theoretical analyses on the disturbed motion of a vehicle as a closed loop system. In: *Fisita World Automotive Congress, Tokyo*, 1976
- [170] UFFELMANN, F. : Influence of Aerodynamics and Suspension on the Cross-Wind Behaviour of Passenger Cars - Theoretical Investigation under Consideration of the Driver's Response. In: *Vehicle System Dynamics, Taylor & Francis* 14 (1985), Nr. 1, S. 19 – 23
- [171] UFFELMANN, F. : Das Seitenwindverhalten bei Personenkraftwagen. In: *Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik* 24 (1986), Nr. 12, S. 329–335
- [172] UYSTEPRUYST, D. ; KRAJNOVIC, S. : Numerical simulation of the transient aerodynamic phenomena induced by passing manoeuvres. In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 114 (2013), S. 62–71
- [173] WAGNER, A. : *Ein Verfahren zur Vorhersage und Bewertung der Fahrerreaktion bei Seitenwind*, Universität Stuttgart, Expert-Verlag, Renningen, 2003
- [174] WALLENTOWITZ, H. : *Fahrer - Fahrzeug - Seitenwind*, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Diss., 1979
- [175] WALLENTOWITZ, H. : Seitenwindverhalten von Kraftfahrzeugen. In: *ATZ Automobil-technische Zeitschrift* 82 (1980), Nr. 9, S. 435–442
- [176] WALLENTOWITZ, H. : Fahren bei Seitenwind. In: *Automobil-Industrie* 2 (1981), S. 163–171
- [177] WATKINS, S. ; HOFFMANN, P. H. ; SAUNDERS, J. W. ; HOLMES, J. D.: Measurement of the turbulent wind environment experienced by a moving vehicle. In: *10th Australian Fluid Mechanics Conference - University of Melbourne*, 1989

- [178] WIEDEMANN, J. (Hrsg.) ; HUCHO, W. H. (Hrsg.): *Progress in Vehicle Aerodynamics III - Unsteady Flow Effects*. Expert-Verlag Renningen, 2004
- [179] WIEDEMANN, J. ; KUTHADA, T. : Interaction of External and Internal Flows. In: *Progress in Vehicle Aerodynamics II - Thermo-Management*. Expert-Verlag Renningen, 2002
- [180] WIERWILLE, W. W. ; CASALI, J. G. ; S., R. B.: Driver steering reaction time to abrupt-onset crosswinds, as measured in a moving-base driving simulator. In: *Human Factors: The Journal of the Human Factors and Ergonomics Society* 25 (1983), Nr. 1, S. 103–116
- [181] WILLUMEIT, A. ; MATHEIS, A. ; MÜLLER, K. : Korrelation von Untersuchungsergebnissen zur Seitenwindempfindlichkeit eines Personenwagens im Fahrsimulator und Prüffeld. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 93 (1991), Nr. 6, S. 28 – 35
- [182] WIMMER, C. : *Modellbasierte Entwicklung elektromechanischer Lenkungen*, Technische Universität Kaiserslautern, Verlag Dr. Hut, München, 2013
- [183] WOJCIAK, J. : *Quantitative Analysis of Vehicle Aerodynamics during Crosswind Gusts*, Technische Universität München, Diss., 2012. <http://mediatum.ub.tum.de/node?id=1095887>
- [184] WOJCIAK, J. ; INDINGER, T. ; ADAMS, N. A. ; THEISSEN, P. ; DEMUTH, R. : Experimental Study of On-Road Aerodynamics during Crosswind Gusts. In: *8th MIRA International Vehicle Aerodynamics Conference, Proceedings*, 2010
- [185] WOLF, H. J.: *Ergonomische Untersuchung des Lenkgefühls an Personenkraftwagen*, Technische Universität München, Diss., 2009. <http://mediatum.ub.tum.de/node?id=737370>
- [186] YAMAMOTO, S. ; YANAGIMOTO, K. ; FUKUDA, H. ; CHINA, H. ; NAKAGAWA, K. : Aerodynamic influence of a passing vehicle on the stability of the other vehicles. In: *JSAE Review* 18 (1997), S. 39–44
- [187] YAMAMOTO, Y. ; SAKAI, H. ; OOKI, M. ; FUKUI, K. ; YASUDA, E. ; SUGUWARA, T. ; ONO, E. : Enhancement of Vehicle Dynamic Behavior Based on Visual and Motion Sensitivity - A Study of Roll Feeling. In: *The 8th International Symposium on Advanced Vehicle Control (AVEC 2006), Proceedings*, 2006
- [188] ZEICHFÜSSL, B. ; BAUER, A. ; FRITZ, P. : Prozess zur Auslegung des Fahrkomforts mithilfe objektiver und virtueller Methoden. In: *3. Internationales Münchner Fahrwerk-Symposium, Proceedings*, 2012
- [189] ZEITLER, A. ; ZELLER, P. : Psychoacoustic Modelling of Sound Attributes. In: *SAE Technical Paper Series 2006-01-0098* (2006), S. 1–10
- [190] ZENS, K. : *Berechnungen zur instationären Fahrzeugumströmung bei Seitenwind*, Technische Universität München, Diss., 2010

- [191] ZHENGQI, G. ; GUICHUN, H. : Research on the Transient State Steering Stability in Side Winds for a High-speed Vehicle Using ADAMS ®. In: *SAE Technical Paper Series* 2005-01-0982 (2005)
- [192] ZHENGQI, G. ; YUFENG, L. ; SEEMANN, W. : The performance of a vehicle with four-wheel steering control in crosswind. In: *Int. J. of Vehicle Autonomous Systems* 1 (2003), Nr. 2, S. 256–269
- [193] ZOMOTOR, A. ; BRAESS, H.-H. ; RÖNITZ, R. : Verfahren und Kriterien zur Bewertung des Fahrverhaltens von Personenkraftwagen - Ein Rückblick auf die letzten 20 Jahre Teil 2. In: *ATZ Automobiltechnische Zeitschrift* 3 (1998), Nr. 6, S. 236 – 243
- [194] ZOMOTOR, A. ; RICHTER, K. H. ; KUHN, W. : *Untersuchungen über die Stabilität und das aerodynamische Störverhalten von PKW-Wohnanhänger-Zügen*. Verlag TÜV Rheinland GmbH, Köln, 1982