

FAT-Schriftenreihe 336

Auswirkung von instationären Anströmeffekten auf die
Fahrzeugaerodynamik

A large, stylized Greek letter alpha (α) is centered on a solid orange background. The letter is rendered in a light orange color, matching the background, and has a thick, rounded font style. The background is a solid, uniform orange color that fills the lower two-thirds of the page.

Auswirkung von instationären Anströmeffekten auf die Fahrzeugaerodynamik

Sachbearbeiter

Christoph Jessing¹
Henning Wilhelmi²

Bereichsleiter

Dr.-Ing. Felix Wittmeier¹
Dr. Daniela Heine²

Professoren

Prof. Dr.-Ing. Andreas Wagner¹
Prof. i.R. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann¹
Prof. Dr. Andreas Dillmann²
Prof. Dr. Claus Wagner²

Forschungsinstitute

¹Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS)

²Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR)

Das Forschungsprojekt wurde mit Mitteln der Forschungsvereinigung
Automobiltechnik e.V. (FAT) gefördert.

Inhalt

Anmerkung	V
FAT AK 6-Mitglieder und -Teilnehmer	VI
Abkürzungen	VII
Formelzeichen	VIII
Kurzfassung	X
1 Einleitung	1
2 Grundlagen	3
2.1 Fahrzeugkoordinatensystem	3
2.2 Aerodynamische Beiwerte	3
2.3 Kennzahlen der instationären Aerodynamik	4
2.3.1 Turbulenzintensität und integrales Längenmaß	5
2.3.2 Spektrale Leistungsdichte	5
2.3.3 1D-Korrelationsfunktion	5
2.4 Kennzahlen für Untersuchungen im Modellmaßstab	7
3 Stand der Technik	9
4 Untersuchungsumgebungen	13
4.1 Fahrversuche	13
4.1.1 Versuchsfahrzeug	13
4.1.2 Straßenfahrt auf der öffentlichen Autobahn	17
4.1.3 Individuelle Fahrmanöver	19
4.2 Windkanäle und Fahrzeugmodelle	23
4.2.1 Modellwindkanal der Universität Stuttgart	23
4.2.2 Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal der Universität Stuttgart	25
4.2.3 Seitenwindversuchsanlage Göttingen des DLR	26
4.2.4 Tunnelsimulationsanlage Göttingen des DLR	31
4.3 Numerische Simulation	34
4.3.1 Simulia PowerFLOW®	34
4.3.2 OpenFOAM	37
5 Ergebnisse der Fahrversuche	46
5.1 Straßenfahrt auf der öffentlichen Autobahn	46
5.1.1 Anströmwinkel	46
5.1.2 Anströmgeschwindigkeit	48
5.1.3 Turbulenzintensität und integrales Längenmaß	49

5.1.4	Oberflächendruckverteilung und -schwankungen.....	50
5.2	Hinterherfahrt auf der DLR-Teststrecke.....	53
5.2.1	Eigenschaften der Anströmung.....	54
5.2.2	Oberflächendrücke.....	64
5.2.3	Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse aus den Hinterherfahrten	67
5.3	Überholmanöver	69
5.3.1	Instationäre Anströmbedingungen	69
5.3.2	Instationäre Druckverteilung am Fahrzeug.....	72
5.3.3	Darstellung des Überholmanövers über mittlere Größen.....	75
5.4	Impulsartiger Seitenwind.....	78
5.4.1	Charakterisierung des Seitenwinds	78
5.4.2	Zeitlich gemittelter Druck.....	79
5.4.3	Instationärer Druck	80
5.4.4	Bewertung/Analyse der Kräfte	83
6	Ergebnisse der Windkanalversuche	85
6.1	Messungen im Modellwindkanal der Universität Stuttgart	85
6.1.1	Voruntersuchungen.....	85
6.1.2	Aerodynamische Charakterisierung des Fahrzeugmodells	95
6.1.3	Auswirkungen instationärer Anströmbedingungen auf den Druckgradienten im Windkanal.....	98
6.1.4	Auswirkungen instationärer Anströmungen auf die Fahrzeugaerodynamik	100
6.2	Messungen im 1:1 Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal der Universität Stuttgart	102
6.2.1	Auswirkungen der Kühlluft auf die Oberflächendruckbeiwerte	103
6.2.2	Auswirkungen instationärer Anströmungen auf die Fahrzeugaerodynamik	104
6.3	Nachbilden der Anströmbedingungen in der leeren Messstrecke der SWG	107
6.3.1	Nachbilden der statistischen Größen T_u und L	107
6.3.2	Erreichte statistischen Größen im Windkanal im Vergleich zu den Fahrversuchen	111
6.3.3	Nachbilden des zeitlich variablen Anströmwinkels in der leeren Messstrecke.....	113
6.4	Bestimmung der auf das 1:4-Modell wirkenden Kräfte für die Hinterherfahrt in der SWG	119
6.4.1	Auswirkung der Anregungsform auf den Widerstandsbeiwert für die Hinterherfahrt.....	119
6.4.2	Validierung der Drücke für die Hinterherfahrt mit den Ergebnissen von der Teststrecke	121
6.4.3	Fazit für die Hinterherfahrt	131
6.5	Bestimmung der auf das 1:4-Modell wirkenden Kräfte beim Überholmanöver in der SWG	132
6.5.1	Validierung der Anströmbedingungen in der SWG anhand der Druckverteilungen aus den Fahrversuchen	133
6.5.2	Instationäre Kraftbeiwerte während des Überholmanövers	135
6.5.3	Fazit für das Überholmanöver	137
6.6	Nachbildung des impulsartigen Seitenwinds in der TSG	137
6.6.1	Einzelfahrten.....	138
6.6.2	Zeitlich gemittelter Druck.....	139

6.6.3	Instationärer Druck	139
6.6.4	Wiederholbarkeit und Sensitivität der Reynolds-Zahl	140
6.6.5	Vergleich mit den Fahrversuchen am BMW-Seitenwindmodul	142
6.6.6	Analyse der Kräfte	144
7	Ergebnisse aus den numerischen Simulationen.....	146
7.1	Simulia PowerFLOW®	146
7.1.1	Numerische Simulation von instationärer Schräganströmung	147
7.1.2	Numerische Simulation instationärer Anströmungen in allen Raumrichtungen	148
7.2	OpenFOAM	152
7.2.1	Simulation der Strömung bei der Hinterherfahrt auf der Teststrecke	152
7.2.2	OpenFOAM-Simulation der Strömung im SWG mit Klappensystem	166
7.2.3	Zusammenfassung der Ergebnisse für die OpenFOAM-Simulationen	172
8	Zusammenfassung.....	174
8.1	Straßenfahrt und Teststrecke	174
8.2	Simulation der Strömung verschiedener Fahrmanöver.....	175
8.3	CFD-Simulationen	178
8.4	Fazit	180
	Literatur	181
	Abbildungsverzeichnis	187
	Tabellenverzeichnis	198

Anmerkung

Das Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS) und das Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) bedanken sich beim Arbeitskreis 6 „Aerodynamik“ der FAT für das Zustandekommen des Projekts und die sehr gute Zusammenarbeit während der dreijährigen Projektlaufzeit.

Besonderer Dank gilt Herrn Dr. Alexander Wäschle für die Leitung des Projekts von Seiten des AK 6, insbesondere auch für die zahlreichen Diskussionen zwischen den Arbeitskreistreffen. Herrn Mathias Hähnel gilt Dank für die Bereitstellung des VW Golf VII sowie des zugehörigen CFD-Netzes. Ebenso danken wir Herrn Dr. Thomas Schütz für die Möglichkeit der Nutzung der Teststrecke Aschheim der BMW Group.

Frau Dr. Daniela Heine, Herrn Dr. James Bell, Herrn Dr. Keith Weinman, Herrn Dr. Felix Wittmeier und Herrn Dr. Timo Kuthada möchten wir für die administrative Betreuung und operative Unterstützung des Projekts danken. Ebenfalls möchten wir uns bei den Herren Prof. Andreas Dillmann, Prof. Andreas Wagner, Prof. Claus Wagner sowie Prof. Jochen Wiedemann für die akademische Unterstützung des Projektes bedanken.

Für den fachlichen Austausch, die Unterstützung und Zusammenarbeit während des gesamten Projektes möchten wir uns außerdem bei den Kolleginnen und Kollegen des DLR und IFS/FKFS bedanken.

FAT AK 6-Mitglieder und -Teilnehmer

Prof. Dr.-Ing. Claudia Langowsky	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.
Dr.-Ing. Alexander Wäschle	Mercedes-Benz AG (Obmann)
Dr.-Ing. Thomas Blacha	Audi AG
Dr. Moni Islam	Audi AG
Dr.-Ing. Michael Schrefl	Audi AG
Dr. Gerhard Wickern	Audi AG
Dr.-Ing. Thomas Schütz	BMW Group
Dr.-Ing. Hannes Vollmer	BMW Group
Dr.-Ing. Teddy Woll	Mercedes-Benz AG
Dr.-Ing. Thomas Eberz	Ford Werke AG
Lothar Krüger	Ford Werke AG
Michael Mandl	Magna Steyr Fahrzeugtechnik AG & CO KG
Severin Stadler	Magna Steyr Fahrzeugtechnik AG & CO KG
Michael Kaufmann	Opel Automobile GmbH
Dr. Thomas Wiegand	Dr.-Ing. h.c. F. Porsche AG
Dr. Petr Sedivy	Skoda Auto
Dr. Zdenek Sloupensky	Skoda Auto
Vojtech Trusik	Skoda Auto
Dr. Michael Hartmann	Volkswagen AG
Mathias Hähnel	Volkswagen AG
Dr. Gerald Kühn	Volkswagen AG
Dr.-Ing. Thomas Landwehr	Volkswagen AG
Dr. Christoph Lietmeyer	Volkswagen AG
Dr. Helmut Berneburg	privat Person
Christoph Jessing	IFS
Dr.-Ing. Felix Wittmeier	IFS/FKFS
Dr.-Ing. Timo Kuthada	IFS/FKFS
Prof. Dr.-Ing. A. Wagner	IFS/FKFS
Prof. i.R. Dr.-Ing. J. Wiedemann	IFS/FKFS
Henning Wilhelmi	DLR
Dr. Daniela Heine	DLR
Dr. James Bell	DLR
Dr. Keith Weinman	DLR
Prof. Dr. C. Wagner	DLR
Prof. Dr. A. Dillmann	DLR

Abkürzungen

CFD	Numerische Strömungssimulation
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
FAT	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.
FKFS	Forschungsinstitut für Kraftfahrwesen und Fahrzeugmotoren Stuttgart
FWK	Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal der Universität Stuttgart
HF	Hinterherfahrt
IFS	Institut für Fahrzeugtechnik Stuttgart
IS	Impulsartiger Seitenwind
KF	Konstantfahrt
MWK	Modellwindkanal der Universität Stuttgart
SWG	Seitenwindversuchsanlage Göttingen
<i>swing</i> [®]	Side Wind Generator
TE150	Statischer Turbulenzerzeuger (klein)
TE300	Statischer Turbulenzerzeuger (groß)
TG	Turbulenzgenerator
TFI	Turbulent Flow Instrumentation Pty Ltd
TS	Teststrecke
TSG	Tunnelsimulationsanlage Göttingen
ÜM	Überholmanöver
VRN	Variable Resolution (Netzverfeinerung) der Stufe N

Formelzeichen

A_x	m^2	Fahrzeugstirnfläche
b	m	Breite
B	m^2	Grenzoberfläche
c	m	Flügeltiefe
C^*	-	Gesamtberechnungszeit
c_A	-	Auftriebskraftbeiwert
c_p	-	Druckbeiwert
$c_{p,rms}$	%	Schwankungen des Druckbeiwerts
c_s	-	Seitenkraftbeiwert
c_{vwk}	-	Kalibrierfaktor der Vorderwagen-Kalibrierung
c_W	-	Luftwiderstandsbeiwert
$c_{W,inst.}$	-	Instationärer Luftwiderstandsbeiwert
$c_{W,stat.}$	-	Stationärer Luftwiderstandsbeiwert
$\bar{c}_{W,quasi-stat.}$	-	Luftwiderstandsbeiwert nach der <i>wind averaged drag</i> Methode
$\Delta c_{W,i-s}$	-	Differenz zwischen dem stationären und instationären Luftwiderstandsbeiwert
d	m	Verdrängungsdicke
f	Hz	Frequenz
F_W	N	Luftwiderstand
h	m	Höhe
L	m	Integrales Längenmaß
L_N	m	Verfeinerte Kantenlänge der Stufe N einer Zelle ($L_N = \frac{L_0}{2^N}$)
L_0	m	Grundkantenlänge einer Zelle
L_s	m	Oberflächen-Kantenlängenskala
l	m	Charakteristische Länge
p_x	Pa	Druck an der Messstelle x
p_{ref}	Pa	Referenzdruck auf der Fahrzeugoberfläche vergleichbar mit dem Luftdruck der Umgebung
$p_{ref,ms}$	Pa	Referenzdruck des Differenzdruckmesssystems (Luftreservoir)
p_∞	Pa	Umgebungsluftdruck

R	-	Korrelationskoeffizient
r_x	m	Abstand zu Zonengrenze
Re	-	Reynolds-Zahl
S	Pa ² /Hz (m/s) ² /Hz	Leistungsdichtspektrum
St	-	Dimensionslose Frequenz (Strouhal-Zahl)
t	s	Zeit
Tu	%	Turbulenzintensität
u	m/s	Geschwindigkeitskomponente in Fahrriichtung
u_∞	m/s	Freie Anströmgeschwindigkeit
v	m/s	Geschwindigkeitskomponente in Querrichtung
v_A	m/s	Anströmgeschwindigkeit
v_F	m/s	Fahrgeschwindigkeit
v_W	m/s	Windgeschwindigkeit
w	m/s	Geschwindigkeitskomponente in Vertikalrichtung
$w(\beta)$	-	Faktor der die Gewichtung der in einem Signal auftretenden Anströmwinkel beschreibt
W		Gewichtung in Übergangszone der CFD Simulation HF
x	m	Strecke in Längsachse
y	m	Strecke in Querachse
z	m	Strecke in Hochachse
z_0	m	OF Rauigkeit
β	deg; °	Anströmwinkel in der horizontalen Ebene
β_{ftap}	deg; °	Ausschlagwinkel des Flaps
δ	-	Differenzial
Δ	<i>variabel</i>	Differenz von zwei Größen
Δ_N	-	Numerische Verfeinerungsschicht N an Oberflächen
∇	-	Nabla-Operator
η	kg/(m·s)	Dynamische Viskosität
μ	m/s; deg	Mittelwert der Normalverteilung
ρ	kg/m ³	Luftdichte
σ	m/s; deg	Standardabweichung der Normalverteilung
τ	s	Zeitlicher Versatz zwischen den zwei Signalen einer Korrelation

Kurzfassung

In dem geförderten FAT-Projekt wurden im Zeitraum von drei Jahren die Auswirkungen von instationären Anströmeffekten auf die Fahrzeugaerodynamik untersucht. Das Projekt wurde in Kooperation des Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik (DLR) und des Instituts für Fahrzeugtechnik Stuttgart (IFS) der Universität Stuttgart bearbeitet. Mit dem Ziel die instationären Anströmeffekte zu identifizieren, wurden in der ersten Phase die repräsentativen Anströmbedingungen in Fahrversuchen ermittelt. In der zweiten Projektphase wurden diese Anströmbedingungen in unterschiedlichen – experimentellen und numerischen – Untersuchungsumgebungen umgesetzt. Die Auswirkung von den instationären Anströmeffekten auf die Fahrzeugaerodynamik wurden in diesen Untersuchungsumgebungen in der dritten Phase ermittelt und analysiert.

Zur Ermittlung der repräsentativen Anströmbedingungen wurden Fahrversuche sowohl im Straßenverkehr auf deutschen Autobahnen, als auch drei repräsentative – häufig im Straßenverkehr auftretende – Verkehrssituationen in Form der Hinterherfahrt, des Überholmanövers und eines plötzlich auftretenden Seitenwindes untersucht.

Für die über 2000 km Straßenfahrt auf öffentlichen Autobahnen hat sich gezeigt, dass die Winkelverteilung der Anströmung mit einer Normalverteilung idealisiert werden kann. Deren Standardabweichung und Mittelwert hängen von der Verkehrsdichte und Fahrgeschwindigkeit ab. Die mittleren Anströmwinkel liegen dabei in einem Bereich von $\mu_\beta = -1^\circ$ bis 3° , während die Standardabweichung zwischen $\sigma_\beta = 2,2^\circ$ und $2,9^\circ$ liegt. Darüber hinaus haben die Studien auf öffentlichen Autobahnen gezeigt, dass die mittlere Anströmgeschwindigkeit nur 86 % der Fahrgeschwindigkeit erreicht.

Die turbulenten Größen in x- und y-Richtung erreichen bei diesen Untersuchungen Werte im Bereich bis 25 % und treten hauptsächlich im Bereich von 5 % bis 7 % auf. Das integrale Längenmaß liegt für diese Straßenfahrt größtenteils bei 1 m, zeigt jedoch ebenfalls Werte von über 12 m.

Bei den Fahrversuchen auf den Teststrecken wurden verschiedene Fahrmanöver zur Nachbildung von einzelnen Verkehrssituationen nachgestellt. Die Hinterherfahrt hinter einem Transporter hat sich dabei als ein realistisches Manöver mit statistisch stationären Strömungseigenschaften herauskristallisiert. Hierbei zeigte sich, dass die Turbulenzintensität mit geringer werdendem Fahrzeugabstand auf Werte von bis zu 25 % zunimmt, während das integrale Längenmaß bzw. die mittlere Anströmgeschwindigkeit auf Werte von bis zu 0,25 m bzw. 64 % der Fahrgeschwindigkeit sinkt. Die instationäre Betrachtung zeigte außerdem, dass im Geschwindigkeitsspektrum der Hinterherfahrt hinter einem Transporter eine dominierende Frequenz bei ca. 2,5 Hz auftritt. Auch die Druckverteilung am Fahrzeug zeigte einen Einfluss des Fahrzeugabstandes sowohl auf den mittleren Druck als auch der zeitlichen Druckentwicklung. Die Hinterherfahrt in 50 m Abstand zu einem Transporter zeigte dabei außerdem auf Grund von vielen Gemeinsamkeiten (mittlere Geschwindigkeit, Turbulenzintensitäten, integrale Längenmaße) gute Übereinstimmungen mit den Ergebnissen der Versuche auf öffentlichen Autobahnen.

Beim Überholmanöver konnte gezeigt werden, dass sich die Strömungsstrukturen in der Anströmung in vier wesentliche Phasen unterscheiden und dass sich diese Phasen auch auf die Druckverteilung am Fahrzeug auswirken.

Im Gegensatz zu der ersten und zweiten Verkehrssituation, besteht der impulsartige Seitenwind, der dritte aus einem Einzelereignis. Dieses wurde an der Seitenwindanlage von BMW in Aschheim mit Vorbeifahrten bei unterschiedlichen Anströmwinden und Anströmgeschwindigkeiten untersucht. Mit Hilfe der Oberflächendrücke konnte gezeigt werden, dass die zeitlichen Druckverläufe Verzögerungen

widerspiegeln, die nicht alleine durch die x-Position der Messstelle am Fahrzeug und dem damit verbundenen späteren Eintreten in den Seitenwind erklärt werden können. Außerdem tritt an einigen Druckmessstellen ein temporäres Überschwingen von bis zu 125 % gegenüber den statisch zu erwartenden Drücken auf. Eine Abschätzung der dynamischen Kräfte zeigt zudem eine Erhöhung von bis zu 50 % gegenüber den statischen Kräften für die unterschiedlichen Raumrichtungen. Diese nichtlinearen Effekte zeigen, dass eine quasi-stationäre Betrachtung zur Untersuchung dieser Verkehrssituation nicht geeignet ist.

Zur Darstellung der drei Fahrsituationen wurden verschiedenen Untersuchungseinrichtungen instrumentiert und Möglichkeiten zur Abbildung der instationären Anströmsituationen untersucht. Zur aktiven Strömungsanregung wurden bewegte Flügel (FKFS *swing*[®]) und statische Flügel mit bewegten Flaps (DLR-Klappensystem) eingesetzt. Für die großen Anströmwinkel des impulsartigen Seitenwinds wurde die Tunnelsimulationsanlage (TSG) in Verbindung mit dem Seitenwindmodul und einem bewegten Modell verwendet.

Durch die instationäre Anströmung, deren Randbedingungen innerhalb der Windkanäle gut kontrolliert werden können, konnten verschiedene Auswirkungen auf die Fahrzeugaerodynamik identifiziert werden. Die Luftwiderstandsbeiwerte nehmen tendenziell mit zunehmenden Schwankungen in der Strömung zu und vergrößern dadurch den Energiebedarf im Vergleich zu stationären Anströmung. Der zeitliche Verlauf hat dabei einen Einfluss auf die Veränderung des Luftwiderstandsbeiwerts und erhöht den cw-Wert bei gleicher mittlerer Anströmgeschwindigkeit. Außerdem verändert die instationäre Anströmung zum Teil die Wirkweise von aerodynamischen Bauteilen und kann damit die Entwicklung eines Fahrzeugs beeinflussen. Die instationären Effekte der Anströmung werden durch eine stationäre Betrachtung nicht dargestellt.

In den CFD-Simulationen mit Simulia PowerFLOW[®] und OpenFOAM konnten die instationären Anströmbedingungen nachgebildet und die in den Versuchsfahrten gemessenen mittleren Oberflächendrücke für instationäre Anströmungen simuliert werden. Dabei wurden verschiedene Ansätze untersucht und sowohl homogene, als auch orts- und zeitabhängige Einlassrandbedingungen verwendet. Für die orts- und zeitabhängigen Einlassrandbedingungen wurden die im Fahrversuch gemessenen Geschwindigkeitssignale der Hinterherfahrt in der xy-Ebene des Arrays interpoliert und als Randbedingung vorgegeben, während für die äußeren Bereiche eine atmosphärische Grenzschicht modelliert wurde. Die Ergebnisse der Simulationen bestätigen, dass die instationären Anströmbedingungen die Luftwiderstandsbeiwerte erhöhen und diese maßgeblich vom Turbulenzgrad in der Anströmung beeinflusst werden.

Um die Strömungsvorgänge im Windkanal (SWG) detailliert betrachten zu können wurde neben der Simulation der Versuchsfahrten ebenfalls das DLR-Klappensystem simuliert. Dabei konnten gute Übereinstimmung mit dem gemessenen Strömungsfeld im Windkanal (SWG) erzielt werden.

Damit konnten die repräsentativen Anströmbedingungen die ein Fahrzeug erfährt sowohl im Straßenverkehr als auch für individuelle Fahrmanöver erfolgreich bestimmt werden. Diese Anströmbedingungen wurden in den experimentellen und numerischen Untersuchungsumgebungen nachgebildet und die Auswirkungen der instationären Anströmung auf die Fahrzeugaerodynamik bestimmt.

Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens bilden damit eine wertvolle Grundlage, um die instationären aerodynamischen Eigenschaften von Kraftfahrzeugen zukünftig besser verstehen zu können und diese Erkenntnisse bereits im Entwicklungsprozess zu berücksichtigen.

1 Einleitung

Der Arbeitskreis Aerodynamik befasste sich in bereits in einem vorherigen Projekt „*Vergleich verschiedener Konzepte der Bodensimulation und von drehenden Rädern zur Nachbildung der Straßenfahrt im Windkanal und deren Auswirkung auf Fahrzeuge*“ (Widdecke, Estrada & Berneburg [1]) intensiv mit der Verbesserung der Darstellung einer Straßenfahrt im Windkanal in Bezug auf die Reifenbewegung. So wurde unter anderem untersucht, wie wichtig der Einfluss von Laufbändern und von drehenden Rädern zur realistischeren Ermittlung des Strömungswiderstands ist und welche Versuchsaufbauten zur experimentellen Simulation geeignet sind.

Der Einsatz von Laufbändern und drehenden Rädern ist heute in Windkanälen üblich, die aerodynamischen Untersuchungen werden jedoch weiterhin mit einer – historisch aus der Luftfahrt stammenden – turbulenzarmen, stationären Anströmung durchgeführt. Diese Anströmverhältnisse entsprechen am ehesten einer Fahrt durch ruhende Luft. Diese Situation ist im Straßenverkehr jedoch eher unüblich, da die Anströmung unter anderem von

- der Fahrt durch die Strömungsfelder anderer Verkehrsteilnehmer,
- Straßenrandobjekten (z.B. Bewuchs, Gebäude, Brücken, Tunnel)
- und wechselnden, natürlich auftretenden Winden

beeinflusst wird. Dies führt zu zeitlich variablen Anströmwinkeln und -geschwindigkeiten. Des Weiteren verändern diese Einflussfaktoren die integralen Längenmaße und Turbulenzintensitäten der Strömung. Um den Einfluss von veränderten Anströmbedingungen abzuschätzen, werden heutzutage im Entwicklungsprozess quasi-statische Messungen anhand von Winkelreihen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten durchgeführt. Der Einfluss der Turbulenzintensität, des integralen Längenmaßes und einer veränderten Anströmung in der Zeit und über die Fahrzeuggeometrie hinweg ist derzeit kein wesentlicher Bestandteil des Entwicklungsprozesses. Windkanalversuche mit instationären Anströmbedingungen deuten jedoch darauf hin, dass eine zeitlich veränderte Anströmung einen Einfluss auf die aerodynamischen Beiwerte haben kann. Im Hinblick auf den Verbrauch und die Reichweite der Fahrzeuge besteht somit insbesondere für den Widerstandsbeiwert c_w ein großes Interesse an einer korrekten Darstellung der Anströmung. Das würde gezielte Optimierungen der Fahrzeugaerodynamik für den allgemeinen Straßenverkehr und – in einem nächsten Schritt – für einzelne Fahrsituationen am Fahrzeug ermöglichen. Darüber hinaus könnte eine für die im Straßenverkehr auftretende Anströmung optimierte Bestimmung des c_w -Wertes die in den Medien oft kritisierte Diskrepanz zwischen den Labor- und real auftretenden Verbrauchswerten reduzieren. Es besteht daher großes Interesse an einer optimierten Übertragbarkeit der Windkanal- und der numerischen Ergebnisse auf den realen Straßenverkehr und einzelne Fahrsituationen.

Daher wurde vom Arbeitskreis 6 der Forschungsvereinigung Automobiltechnik ein Projekt mit dem Ziel **eine Methode zu entwickeln, die es ermöglicht die Luftkraftbeiwerte eines Kraftfahrzeugs unter Berücksichtigung der realen, instationären Anströmsituation der Straße zu ermitteln**

mit einer Projektlaufzeit von drei Jahren gestartet.

Um dieses Ziel zu erreichen muss die Thematik der instationären Anströmung auf der Straße und in unterschiedlichen Fahrsituationen möglichst ganzheitlich betrachtet werden. Hierzu war das Projekt in drei Phasen (Abbildung 1-1) aufgeteilt:

- Phase 1: Zunächst wurden die wichtigsten aerodynamischen Größen (zeitlich aufgelöste Geschwindigkeitskomponenten und Oberflächendruckverteilung) im deutschen Straßenverkehr und für individuelle Fahrmanöver auf Teststrecken mit einem Versuchsfahrzeug detailliert bestimmt.
- Phase 2: Anhand der gewonnenen Daten wurden Methoden entwickelt, um die wichtigsten Parameter aus Phase 1 für die Straßen- und Teststreckenfahrten in unterschiedlichen Untersuchungs-umgebungen nachzustellen.
- Phase 3: Diese Methoden wurden an einem 1:4-Modell des Versuchsfahrzeugs getestet und mit den Ergebnissen aus 1:1-Messungen sowie den Ergebnissen aus den Teststreckenfahrten abgeglichen. Des Weiteren wurden unterschiedliche Geometrievariationen am Modell und deren Effizienz unter stationärer und instationärer Anströmung verglichen.

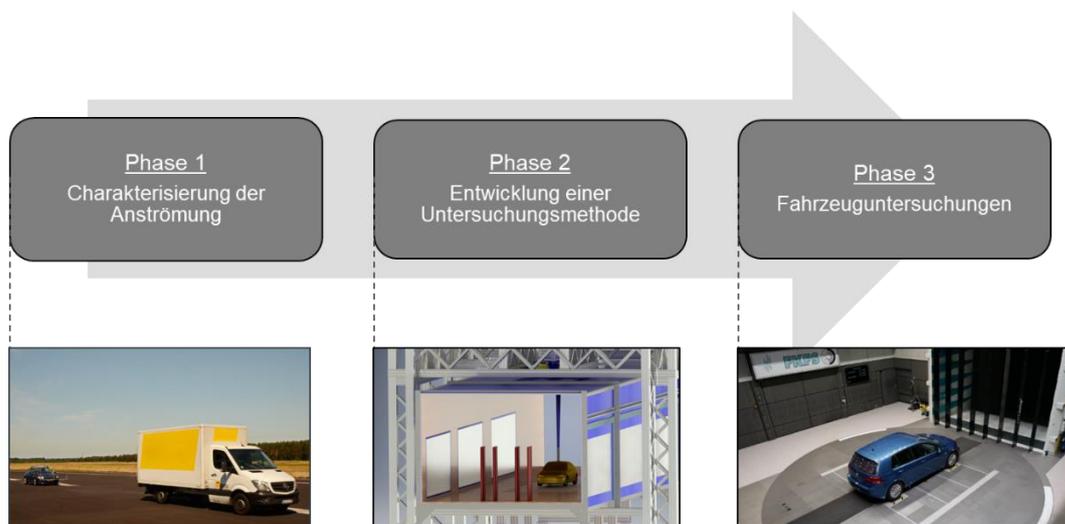


Abbildung 1-1: Übersicht des in 3 Phasen unterteilten Forschungsprojekts.

2 Grundlagen

Als Grundlage für diesen Forschungsbericht werden, zur eindeutigen Berichterstattung, verschiedene Kennzahlen und Definitionen benötigt. Die für die Forschungsarbeit wichtigen und verwendeten Grundlagen werden im Folgenden beschrieben.

2.1 Fahrzeugkoordinatensystem

Beginnend werden die Definition des Fahrzeugkoordinatensystems und der relevanten Geschwindigkeiten vorgestellt und ist in Abbildung 2-1 dargestellt.

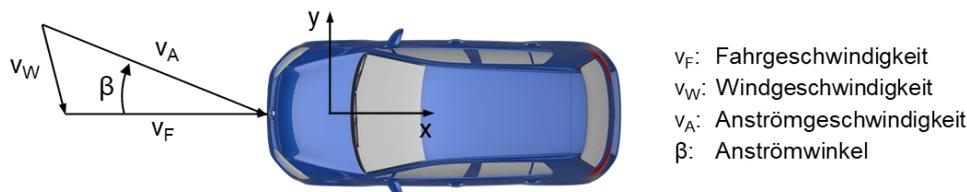


Abbildung 2-1: Definition der relevanten Geschwindigkeiten und des Fahrzeugkoordinatensystems [2].

Das Fahrzeugkoordinatensystem besitzt seinen Ursprung in der Mitte der Vorderachse. In der Abbildung ist der Ursprung der x- und y-Achse dargestellt. Der Ursprung der z-Achse ist darin nicht dargestellt. Dieser befindet sich, so wie der Ursprung der anderen Achsen und für ein Fahrzeug üblich, in der Mitte der Vorderachse [3]. Die positive Richtung der z-Achse ist dabei vom Boden ausgehend in Richtung des Fahrzeugdachs definiert.

Die Fahrgeschwindigkeit v_F entspricht der Geschwindigkeit mit der sich das Fahrzeug über die Straße bewegt. Dieser Festlegung folgend wird ebenfalls der Wind definiert und beschreibt die Windgeschwindigkeit über Grund mit der Variable v_W . Resultierend aus der Fahr- und Windgeschwindigkeit ergibt sich die Anströmgeschwindigkeit v_A . Diese trifft unter dem Anströmwinkel β auf das Fahrzeug.

2.2 Aerodynamische Beiwerte

Die aus der Fahrzeugumströmung resultierenden Kräfte werden in der Fahrzeugaerodynamik mit dimensionslosen Beiwerten beschrieben. Der Luftwiderstandsbeiwert c_W ist definiert als:

$$c_W = \frac{F_W}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_x \cdot v_A^2} \quad \text{Gleichung (1)}$$

Mit:

- A_x : Stirnfläche in m^2
- ρ : Luftdichte in kg/m^3
- v_A : Anströmgeschwindigkeit/Laufbandgeschwindigkeit in m/s
- F_W : Luftwiderstandskraft in N

Der Luftwiderstandsbeiwert kann sowohl für stationäre $c_{W,stat}$ als auch für instationäre Anströmungen $c_{W,instat}$ im Windkanal ermittelt werden. Bei der instationären Anströmung sind wechselnde Anströmwinkel, also Schräganströmung, ein wichtiger Bestandteil. Der Luftwiderstandsbeiwert unter Schräganströmung kann sowohl im Windkanal, als auch in der numerischen Simulation ermittelt werden.

Mit Hilfe der *wind averaged drag* Methode können die Luftwiderstandsbeiwerte unter Schräganströmung entsprechend eines Zeitsignals mit verschiedenen Anströmwinkeln gewichtet werden. Mit den Gewichtungsfaktoren kann der stationäre Luftwiderstandsbeiwert entsprechend eines Zeitsignals in einen quasi-stationären Luftwiderstandsbeiwert überführt werden [4, 5]. Diese Vorgehensweise folgt dem Zusammenhang:

$$\bar{c}_{W,quasi-stat.} = \sum_{\beta_{min}}^{\beta_{max}} c_{W,stat.}(\beta) \cdot w(\beta) \quad \text{Gleichung (2)}$$

Mit:

- $c_{W,stat.}$: Stationärer Luftwiderstandsbeiwert
- β : Anströmwinkel in °
- w : Faktor zur Gewichtung der Anströmwinkel entsprechend eines Signals

Neben dem Luftwiderstandsbeiwert werden in der Fahrzeugaerodynamik weitere verschiedene physikalische Kennzahlen verwendet. Zur Quantifizierung der Umströmung des Fahrzeugs werden beispielsweise die Drücke auf der Fahrzeugoberfläche verwendet. Wie beim Luftwiderstandsbeiwert werden die Drücke auf der Fahrzeugoberfläche als dimensionslose Kennzahl dargestellt. Der Druckbeiwert c_p der Messstelle x ist wie folgt definiert:

$$c_p = \frac{p_x - p_\infty}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_A^2} \quad \text{Gleichung (3)}$$

Mit:

- p_x : Druck an der Messstelle x in Pa
- p_∞ : Umgebungsdruck in Pa
- ρ : Luftdichte in kg/m³
- v_A : Anströmgeschwindigkeit/Laufbandgeschwindigkeit in m/s

2.3 Kennzahlen der instationären Aerodynamik

Die Schwankungen des Druckbeiwerts der Oberflächendrücke geben Aufschluss über die instationären Vorgänge auf der Fahrzeugoberfläche. Aus den zeitdiskreten Drücken wird, zur Analyse der instationären Vorgänge, die Standardabweichung gebildet und mit dem mittleren Staudruck normiert. Die resultierende Kennzahl wird $c_{p,rms}$ genannt und beschreibt die prozentuale Schwankungsbreite der Druckbeiwerte. Die Definition lautet:

$$c_{p,rms} = \frac{\sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (p_i - \bar{p})^2}}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \bar{v}_A^2} \cdot 100 \% \quad \text{Gleichung (4)}$$

Mit:

- i : Summationsvariable
- \bar{p} : Mittlerer Druck der Messstelle x in Pa
- p_i : Druck der Summationsvariable i der Messwertreihe der Messstelle x in Pa
- n : Anzahl der Werte der Messwertreihe
- ρ : Luftdichte in kg/m^3
- v_A : Anströmgeschwindigkeit/Laufbandgeschwindigkeit in m/s

2.3.1 Turbulenzintensität und integrales Längenmaß

Die Bestimmung von instationären Anströmbedingungen ist neben den Luftwiderstandsbeiwerten und Oberflächendrücken ein wichtiger Bestandteil dieser Forschungsarbeit. Die Beschreibung der instationären Anströmung die ein Fahrzeug erfährt kann neben Anströmgeschwindigkeit und -winkel auch mit der Turbulenzintensität Tu und dem integralen Längenmaß L erfolgen. Die Turbulenzintensität ist ein Maß für die Schwankung der räumlichen Komponenten der Anströmgeschwindigkeit. Diese ist definiert als:

$$Tu_i = \frac{\sqrt{\bar{v}'_{A,i}{}^2}}{\bar{v}_A} \cdot 100 \% \quad \text{Gleichung (5)}$$

Mit:

- i : Raumrichtung
- $\bar{v}'_{A,i}$: Mittlere Varianz der Anströmgeschwindigkeit in m/s
- \bar{v}_A : Mittlere Anströmgeschwindigkeit/Laufbandgeschwindigkeit in m/s

Das integrale Längenmaß ist ein charakteristisches Maß mit dem die Größe der Wirbel in einer Anströmung bzw. die Dimensionen einer Schwankung quantifiziert werden können.

Das integrale Längenmaß kann mit verschiedenen Ansätzen wie das „von Kármán Längenmaß“ oder der Autokorrelationsfunktion berechnet werden [6, 7]. Die nachfolgend dargestellten Ergebnisse des integralen Längenmaßes sind mit Hilfe des Autokorrelationsansatzes bestimmt. Die Turbulenzintensität und das integrale Längenmaß können in allen Raumrichtungen berechnet werden. Für die Untersuchungen im bodennahen Bereich sind die x - und y -Richtungen des integralen Längenmaßes jedoch ausreichend.

2.3.2 Spektrale Leistungsdichte

Die spektrale Leistungsdichte $S(i)$ eines Zeitsignals i beschreibt die Verteilung der Leistung der enthaltenen Frequenzkomponenten, aus denen das Signal besteht. Die spektrale Leistungsdichte kann für jedes Zeitsignal ermittelt werden. In dieser Arbeit werden die Zeitsignale der Anströmgeschwindigkeiten u , v und w verwendet. Die Zeitsignale der Anströmgeschwindigkeit, die ein Fahrzeug erfährt, besitzen ein charakteristisches Leistungsdichtespektrum und dienen dadurch als Vergleichsgröße bei der Simulation der Versuchsfahrten in den Untersuchungsumgebungen. Zusätzlich können mit der spektralen Leistungsdichte Frequenzen mit großem Energieinhalt identifiziert werden. In diesem Forschungsprojekt wird die spektrale Leistungsdichte mit der Welch-Methode berechnet.

2.3.3 1D-Korrelationsfunktion

Mit Hilfe der Korrelation kann die Ähnlichkeit eines Signals mit sich selbst (Autokorrelation) oder von 2 Signalen (Kreuzkorrelation) bewertet werden. Um die Ähnlichkeit von 2 Signalen zu quantifizieren, kann folgende Formel verwendet werden:

$$R^* = \sum_{n=0}^N x_1(n) \cdot x_2(n) \quad \text{Gleichung (6)}$$

Der Korrelationskoeffizient R^* beschreibt eine Korrelation von den 2 Signalen x_1 und x_2 mit der Länge N . In den vorliegenden Untersuchungen stammen die beiden Signale von unterschiedlichen Messpositionen und sind Zeitsignale der Schwankungen der Geschwindigkeitskomponenten oder Druckschwankungen. Die Länge N des Signals ist somit die Messdauer t_{ges} und n entspricht einem beliebigen Zeitpunkt t in der Messreihe. Gemäß Gleichung (6) werden zu jedem Zeitschritt die Werte von $x_1(n)$ und $x_2(n)$ miteinander multipliziert und die Produkte über die Länge des Signals aufsummiert. Weisen die Signale eine große Ähnlichkeit auf, so ergibt sich für R^* ein hoher Wert. Sind die Signale nicht korreliert, so ist R^* niedrig – im Idealfall 0. Zeigen die Signale ein umgekehrtes Schwankungsverhalten, so ist R^* negativ.

Wie zuvor erwähnt, können nicht nur 2 Signale miteinander korreliert werden, sondern auch ein Signal mit sich selbst. In diesem Falle spricht man von einer Autokorrelation und Gleichung (6) vereinfacht sich zu:

$$R^* = \sum_{n=0}^N x_1(n)^2 \quad \text{Gleichung (7)}$$

Die Autokorrelation ist zunächst naturgemäß vollständig mit sich selbst korreliert. Gleichung (6) und Gleichung (7) beschreiben den Vergleich der Signale jedoch nur, wenn die Signale direkt übereinander liegen. Es ist jedoch denkbar, dass es zwischen den Signalen zu einer Verzögerung kommt. So kann im Falle von Gleichung (6) ein Signal beispielsweise mit der Strömungsgeschwindigkeit konvektieren und demnach an der Messstelle von x_1 gemessen werden, bevor das Signal die Messstelle von x_2 erreicht. Auf Grund der Verzögerung zwischen den Signalen fällt die Korrelation kleiner aus, als wenn ein Zeitversatz berücksichtigt würde. Um einen eventuellen zeitlichen Einfluss berücksichtigen zu können, wird basierend auf Gleichung (6) ein Versatz τ für das Signal x_2 eingeführt. Somit erhält man die 1D-Kreuzkorrelationsfunktion:

$$R^*(\tau) = \sum_{n=0}^N x_1(n) \cdot x_2(n + \tau) \quad \text{Gleichung (8)}$$

Dadurch ergibt sich der Verlauf des Korrelationskoeffizienten R^* über τ . Im Fall eines Zeitsignals handelt es sich bei τ um eine Zeitverzögerung. Die Schrittweite von τ ist dabei durch das zeitliche Auflösungsvermögen der Messung vorgegeben. Im Fall der Autokorrelation ergibt sich aus Gleichung (8) dann:

$$R^*(\tau) = \sum_{n=0}^N x_1(n) \cdot x_1(n + \tau) \quad \text{Gleichung (9)}$$

Der Wert des Korrelationskoeffizienten hängt jedoch nicht nur von der Ähnlichkeit der beiden Signale ab, sondern auch von den Signalen selbst. Hohe Amplituden bei korrelierten Signalen führen zu größeren Korrelationskoeffizienten als bei korrelierten Signalen mit niedrigen Amplituden. Das liegt daran, dass die beiden Signale miteinander multipliziert werden. Um die durchgeführten Korrelationen vergleichen zu können, wird eine Normierung des Korrelationskoeffizienten eingeführt:

$$R(\tau) = \frac{\sum_{n=0}^N x_1(n) \cdot x_2(n + \tau)}{\sqrt{\sum_{n=0}^N (x_1(n))^2} \cdot \sqrt{\sum_{n=0}^N (x_2(n))^2}} \quad \text{Gleichung (10)}$$

Zur Normierung der Korrelationskoeffizienten wird Gleichung (10) durch den Effektivwert der Autokorrelationen an den betrachteten Sonden geteilt. Damit bewegt sich der Korrelationskoeffizient in einem Bereich zwischen -1 und 1. Bei einem Wert von 1 ist der Signalverlauf für die Geschwindigkeitsschwankungen zwischen den beiden Sonden identisch. Bei einem Wert von -1 handelt es sich um das gleiche Signal mit umgekehrtem Verlauf. Im Bereich um 0 besteht keine Ähnlichkeit im Verlauf der Signale. Die normierte Autokorrelation ergibt sich aus Gleichung (10) als:

$$R(\tau) = \frac{\sum_{n=0}^N x_1(n) \cdot x_1(n + \tau)}{\sum_{n=0}^N (x_1(n))^2} \quad \text{Gleichung (11)}$$

Mit Hilfe der Korrelationen können beispielsweise Strukturen in der Strömung identifiziert werden. Taylor [8] stellte die Hypothese auf, dass sich Strukturen im Fluid mit einer festen Geschwindigkeit im Fluid fortbewegen. Misst man jetzt beispielsweise mit dem Fahrzeugarray die Geschwindigkeitskomponenten über die Breite des Arrays, so könnten sich genügend große Strukturen auf die Signale an mehreren Messpunkten des Arrays auswirken. Dieses würde zu hohen Korrelationskoeffizienten zwischen den Sonden signalen führen. Vergleicht man die Signale von mehreren Messpunkten mit derselben Referenz, so lassen sich Rückschlüsse ziehen, welches Ausmaß die Struktur über die Fahrzeugbreite annimmt.

Betrachtet man den Verlauf einer Korrelation der Geschwindigkeitskomponenten mit τ , so lässt sich die Strukturgröße in Fahrtrichtung über die Ähnlichkeit der Signale mit Zeitversatz abschätzen. Handelt es sich um große Strukturen, wird sich das Signal über die Zeit nur geringfügig ändern und die Korrelation bleibt über τ groß, während ein Rauschen schnell zu einem unkorrelierten Signal führen würde. Diese Tatsache wird beispielsweise zur Berechnung des integralen Längenmaßes genutzt. Für diese Berechnung wird die Autokorrelation eines Geschwindigkeitssignals betrachtet (siehe Abschnitt 2.3.1).

2.4 Kennzahlen für Untersuchungen im Modellmaßstab

Neben Untersuchungen im Maßstab 1:1 werden in diesem Forschungsprojekt auch Experimente im Maßstab 1:4 und Maßstab 1:10 durchgeführt. Bei aerodynamischen Untersuchungen mit skalierten Modellen sind verschiedene physikalische Einflüsse zu beachten. Neben der geometrischen Ähnlichkeit kommen verschiedene dimensionslose Kennzahlen zum Einsatz. Diese werden verwendet um eine möglichst große Vergleichbarkeit der Untersuchungsbedingungen zu erreichen. Zu diesem Zweck kommen die Reynolds-Zahl Re , Mach-Zahl Ma und Strouhal-Zahl St zum Einsatz.

Die Reynolds-Zahl Re beschreibt das Verhältnis der in einer Strömung wirkenden Trägheits- und Zähigkeitskräfte. Damit vergleichbare Strömungsbedingungen im Modell- und Originalmaßstab herrschen sind die Reynolds-Zahlen der Untersuchungsmaßstäbe gleich zu halten. Die Reynolds-Zahl Re ist definiert als:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot l}{\eta} \quad \text{Gleichung (12)}$$

Mit:

- ρ : Luftdichte in kg/m^3
- v : Strömungsgeschwindigkeit in m/s
- l : Charakteristische Länge in m
- η : Dynamische Viskosität in $\text{Pa} \cdot \text{s}$

Als charakteristische Länge wird in der Fahrzeugaerodynamik üblicherweise die Fahrzeuglänge herangezogen. Die Luftdichte hängt von der Umgebungstemperatur und relativen Luftfeuchte ab und ist damit

ein Messwert der während Messungen aufgezeichnet werden muss. Die dynamische Viskosität ist ebenfalls von der Umgebungstemperatur abhängig. Allerdings hat der in Deutschland vorliegende klimatische Temperaturbereich nur einen geringen Einfluss auf die dynamische Viskosität.

Durch Unterschiede in den Strömungsgeschwindigkeiten verändern sich jedoch die zeitabhängigen Mechanismen, so dass für instationäre Untersuchungen weitere Betrachtungen notwendig sind. Mit Hilfe der Strouhal-Zahl können frequenzabhängige Mechanismen, hier am Beispiel der Wirbelablösefrequenz, dimensionslos betrachtet werden. Diese ist definiert als:

$$St = \frac{f \cdot l}{v} \quad \text{Gleichung (13)}$$

Mit:

- f : Wirbelablösefrequenz in Hz
- l : Charakteristische Länge in m
- v : Strömungsgeschwindigkeit in m/s

Bei gleicher Strouhal-Zahl können frequenzabhängige Ereignisse unter verschiedenen Maßstäben und Strömungsgeschwindigkeiten verglichen werden. Wie bei der Reynolds-Zahl wird in der Fahrzeugaerodynamik für die charakteristische Länge häufig die Fahrzeuglänge oder der Radstand verwendet. In dieser Forschungsarbeit wird sowohl für die Berechnung der Reynold-Zahl, als auch der Strouhal-Zahl – sofern nicht anders vermerkt – die Fahrzeuglänge verwendet.

3 Stand der Technik

Fahrzeugaerodynamische Optimierungen im Windkanal sowie numerische Simulationen werden heute üblicherweise mit vereinfachter, idealisierter und stationärer Anströmung mit geringer Turbulenzintensität durchgeführt. Diese bildet jedoch nicht unbedingt die komplexe Vielfalt der im Straßenverkehr auftretenden Anströmbedingungen ab. Aktuelle Untersuchungen zeigen, dass es große Variationen in den Anströmbedingungen im Straßenverkehr gibt, die von vielen Faktoren, wie zum Beispiel Wind, anderen Verkehrsteilnehmern und Straßenrandobjekten abhängig sein können. Lindener et al. [9] zeigten beispielsweise im Zuge von akustischen Untersuchungen, dass die Turbulenzintensität in Fahrtrichtung, je nach Verkehrsdichte, im Mittel zwischen 3 % und 7 % beträgt. Dabei ermittelten sie integrale Längenskalen L_x zwischen 1 m und 9 m. Wordley [10] und Wordley & Saunders [11] führten Messungen im australischen Straßenverkehr durch. Ihre Messungen zeigten ebenfalls eine deutliche Abhängigkeit der Turbulenzintensitäten und Längenskalen von der Verkehrsdichte sowie von den Straßenrandobjekten. Dabei ergaben sich Turbulenzintensitäten von bis zu 16 % und Längenskalen bis 25 m (siehe Abbildung 3-1).

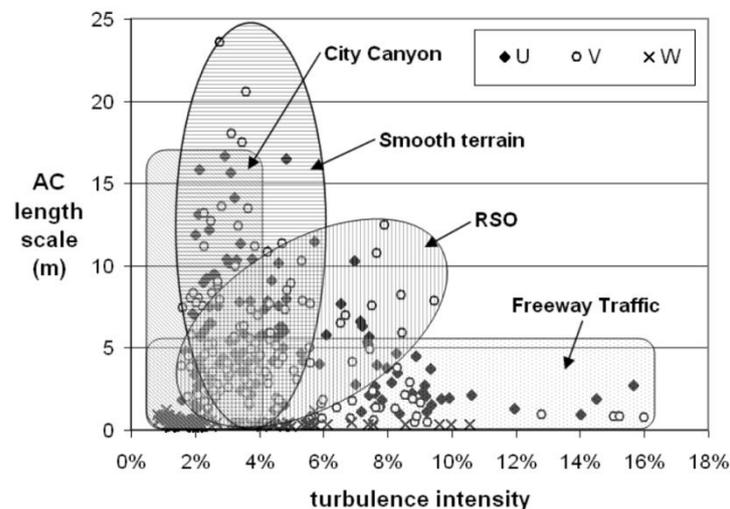


Abbildung 3-1: Verteilung der Turbulenzintensitäten („turbulence intensity“) und integralen Längenskalen („AC length scale“) in den unterschiedlichen Raumrichtungen (u, v, w) für unterschiedliche Verkehrs- und Geländesituationen [10].

Diese Ergebnisse wurden von McAuliffe, Belluz & Belzile [12] zu großen Teilen bestätigt. Des Weiteren wurden sowohl von Wordley als auch von McAuliffe die Verhältnisse der Turbulenzintensitäten zueinander bestimmt. Beide stellten eine Anisotropie fest, bei der Tu_x und Tu_y in etwa gleich groß sind, während Tu_z/Tu_x zwischen 60 % (Wordley) und 40 % (McAuliffe) liegt. Diese Werte liegen deutlich unter den Werten für die anderen Raumrichtungen. Schröck [13] führte Fahrversuche bei starken Seitenwinden durch. Auch er ermittelte in extremen Wetterbedingungen Turbulenzintensitäten gleicher Größe in x- und y-Richtung von bis zu 8 % und Längenskalen von bis 60 m. Des Weiteren zeigte er, dass Anströmwinkel bis zu 10° während der Straßenfahrt auftreten. Untersuchungen von Windböen wurden von Wojciak et al. [14] durchgeführt. Die Strömungsmessung erfolgte ca. 1 m vor dem Fahrzeug. Für Windböen wurden die Turbulenzintensitäten von 1 % - 3 % auf bis zu 7 % verstärkt und die Anströmgeschwindigkeit um maximal 6 % gesteigert. Die Untersuchungen zeigen, dass der Bodenabstand im Bereich von 0,25 - 0,75 m nur einen geringen Einfluss auf die Ergebnisse der Strömungsgeschwindigkeiten und Turbulenzintensitäten hat.

In den zuvor genannten Versuchen von Lindener [9], Wordley [10, 11], McAuliffe [12], Schröck [13] und Wojciak [14] wurden Abhängigkeiten der Anströmung von Straßenrandobjekten, der Verkehrsdichte und dem Wetter festgestellt. Die Anströmung wurde dabei üblicherweise über die statistischen Größen der Turbulenzintensität, verschiedener Längenmaße und über die Häufigkeitsverteilung der Anströmwinkel beschrieben.

Neben den Untersuchungen im Straßenverkehr mit den vielfältigen, teils schwer reproduzierbaren Verkehrssituationen, sind auch einzelne Fahrmanöver mit ihrem Einfluss auf die Anströmung und das Fahrzeug von großem Interesse. So ist es nicht unüblich, dass ein Verkehrsteilnehmer hinter einem anderen Fahrzeug hinterherfährt, dass ein Überholmanöver durchgeführt wird oder dass ein impulsartiger Seitenwind auftritt. Daher werden zunehmend auch die instationären Anströmbedingungen von Fahrmanövern untersucht. So zeigte Kremheller [15] anhand von Drücken, die an 13 Stellen gemessen wurden, den Einfluss eines Überholmanövers und einer Fahrzeugbegegnung auf die Druckverteilung. Lichtneger & Ruck [16] untersuchten die instationären Auswirkungen eines Transporters auf ein Straßenrandobjekt während einer Vorbeifahrt. Mit Hilfe der durchgeführten Versuche konnte gezeigt werden, dass durch das Fahrzeug instationäre Kräfte auf eine am Streckenrand positionierte Fläche ausgeübt werden.

In den genannten Veröffentlichungen wurden entweder die Geschwindigkeitskomponenten bestimmt oder punktuell Oberflächendrücke verwendet, jedoch wurde kaum beides detailliert zusammen bei Straßen- und Teststreckenfahrten betrachtet. Eine genaue Kenntnis der zeitlich veränderlichen Anströmung und der detaillierten Oberflächendruckverteilung am Fahrzeug ist jedoch für die Entwicklung experimenteller Systeme zur Erzeugung von instationären Anströmungen und numerischen Simulationen sowie deren Validierung nötig.

Um die Anströmbedingungen in den Versuchsumgebungen zu verbessern, wurde bisher eine Vielzahl verschiedener Ansätze veröffentlicht. So wurde von Ingram [17] ein quasi-statischer Ansatz des *wind-averaged drag* ($\overline{c_w}$) eingeführt. Der Ansatz basiert auf der Annahme, dass ein Fahrzeug mit konstanter Fahrgeschwindigkeit v_F über die Zeit unterschiedliche resultierende Anströmgeschwindigkeiten (v_A) und -winkel (β) auf Grund von Windeinfluss (v_W) erfährt. Die zugehörigen statischen Kräfte $c_w(\beta)$ bei unterschiedlichen Anströmwinden und Geschwindigkeiten müssen hierzu im Windkanal oder in numerischen Simulationen ermittelt werden. Ist die Häufigkeitsverteilung der unterschiedlichen Kombinationen für die Anströmung ($w(v_W, \beta)$) bekannt, so kann nach Ingram aus den statischen Kräften der *wind-averaged drag* gemäß Gleichung (14) berechnet werden:

$$\overline{c_w} = \int_0^{360^\circ} \int_0^{v_{W,max}} c_w(\beta) \cdot \left[1 + \left(\frac{v_W}{v_A} \right)^2 + 2 \left(\frac{v_W}{v_F} \right) \cdot \cos(\beta) \right] w(v_W, \beta) dv_W d\beta \quad \text{Gleichung (14)}$$

Wojciak [18] ermittelte die auftretenden dynamischen Kräfte, indem das Fahrzeugmodell im Windkanal aktiv in einer sinusförmigen Bewegung um seine Hochachse zur Simulation von Böen gedreht wurde. McAuliffe & D'Auteuil [19] nutzten passive Turbulenzgeneratoren, um das zuvor in Straßenfahrten ermittelte Windspektrum darzustellen.

Neben diesen passiven Ansätzen gibt es eine Reihe aktiver Ansätze, um instationäre Anströmungen im Automobilbereich zu simulieren. So wird an der Durham University mit Hilfe von aktiven Flaps, die an den Seiten des Düsenauslasses angebracht sind, die gesamte Strömung des zu $\frac{3}{4}$ offenen Kanals gleichmäßig über die gesamte Breite der Messstrecke voll korreliert ausgelenkt. Bei diesen Untersuchungen wurden die Flaps mit einer Frequenz von bis zu 10 Hz bewegt (Mankowski, Sims-Williams, Dominey et al. [20]). Schröck [15], Wittmeier [21] und Stoll [22] nutzten hingegen ein Array aus drehbaren Flügeln, die in der Kanaldüse installiert waren, um das turbulente Spektrum und die Frequenzverteilung

aus Straßenversuchen über die Anströmwinkel zur Ermittlung der auftretenden Seitenkräfte zu simulieren. Auch Yamashita, Makihara, Maeda & Tadakuma [23] nutzten bewegliche Flügel – die bei einer sinusförmigen Bewegung mit bis zu 5 Hz angetrieben werden konnten – in Kombination mit einem zusätzlichen System zur Kontrolle der Strömungsgeschwindigkeit. Ebenso wurden bei Pininfarina aktive Flügel zur Strömungskontrolle eingesetzt (z.B. [24]). Von Weitemeyer, Reinke, Peinke & Hölling [25] wurden gezielt Turbulenzintensitäten zur Simulation der Anströmung von Windkraftanlagen erzeugt. Hierzu wurden rautenförmige Elemente im Düsenbereich um die y- und z-Achse mit unterschiedlichen Frequenzen und Phasen rotiert. Zur Simulation von impulsartigen Seitenwinden wurde unter anderem von Volpe, Da Silva, Ferrand & Le Moyne ein 2. Windkanal eingesetzt, der quer zur Hauptströmung des ersten Kanals über eine regelbare Öffnung plötzlich eine Querströmung einbrachte. Zur Simulation von plötzlich auftretendem Seitenwind auf Hochgeschwindigkeitszüge nutzten Bell, Ehrenfried & Wagner [26] ein Katapult mit dem ein Zugmodell auf Schienen beschleunigt wurde. Der plötzliche Seitenwind wurde durch einen Windkanal mit offener Messstrecke erzeugt. Das Zugmodell bewegte sich senkrecht durch die vom Windkanal erzeugte Strömung. Damit konnte die zeitliche Ausbreitung der Böe über die Zuglänge zuverlässig vorhergesagt werden. Heine, Ehrenfried, Heine & Huntgeburch [27] nutzen die selbe Versuchsanlage ohne Seitenwindmodul, um Vorbeifahrten an Streckenrandobjekten (Einfahrt in Tunnelportale) zu untersuchen. Der Ansatz, dass das Modell bewegt wurde, erlaubte – im Gegensatz zu stationären Modellen in klassischen Windkanälen – die realistischere Nachbildung der Fahrt in Relation zum Tunnelportal.

Neben den experimentellen Untersuchungen gibt es unterschiedliche numerische Ansätze zur Abbildung der Straßenfahrt beziehungsweise einzelner Fahrmanöver. So wurde beispielsweise von Gaylard, Oettle, Gargoloff & Duncan [28] die Strömung mit realistischen Turbulenzintensitäten und Längenmaßen simuliert. Dalassio et al. [29] nutzen einen ähnlichen Ansatz basierend auf den Ergebnissen von McAuliffe [12], um den Widerstand unter Berücksichtigung von vorgegebenen Fahrprofilen aus den Norm-Verbrauchsuntersuchungen zu berechnen. Wojciak [18] und Theissen [30] simulierten sinusförmige Böenprofile und ihren Einfluss auf die Fahrstabilität. Jessing, Stoll, Kuthada & Wiedemann [31] führten Berechnungen zum FKFS *swing*[®]-System durch (Abbildung 3-2). Bei den CFD-Simulationen von Forbes, Page, Passmore & Gaylard [32] sowie von Carbonne, Winkler & Efraimsson [33] wurde der Einfluss von plötzlich auftretenden Seitenwinden auf die Seitenkraft untersucht. Dabei konnte festgestellt werden, dass die verwendeten quasi-statischen Betrachtungsmethoden der Kräfte geringere Seitenkräfte ergaben als in instationären CFD-Simulationen berechnet wurde.

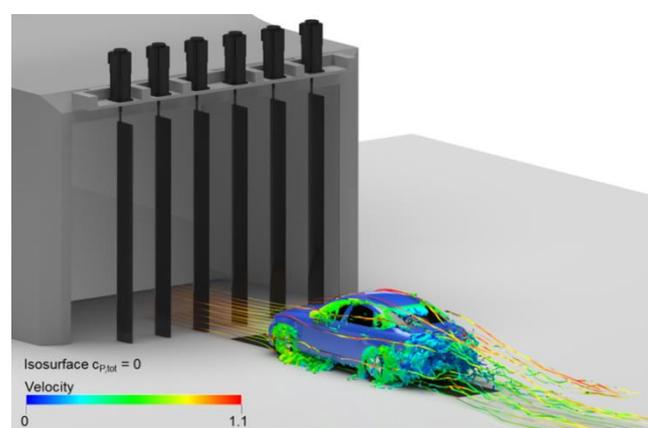


Abbildung 3-2: Strömungslinien und Geschwindigkeitsbeträge um ein Fahrzeug in einer Windkanalumgebung mit FKFS *swing*[®] [31].

Schito & Braghinn [34] simulierten für unterschiedliche Kombinationen von Fahrzeugtypen die Umströmung von Konvoi-Konfigurationen und stellten fest, dass sich die berechneten Widerstände in Abhängigkeit von der Reihung der Fahrzeuge unterscheiden. Mosedale [35] untersuchte numerisch ein Überholmanöver, an dem 2 IndyCars beteiligt waren. Seine Ergebnisse zeigten, dass während des Überholmanövers der Abstand zum vorherfahrenden Fahrzeug einen deutlichen Einfluss auf Auftriebs- und Widerstandskraft hat.

Die mit den unterschiedlichen Untersuchungsmethoden erzielten Ergebnisse zeigten unter anderem, dass die Turbulenzintensität die am Fahrzeug auftretenden Kräfte stark beeinflussen kann. So konnten Schröck [15] und Stoll [22] durch Auswertung der Admittanz zeigen, dass bestimmte Anregungsfrequenzen (und somit Längenskalen) zu Seitenkrafteerhöhungen von über 20 % führen können. Darüber hinaus haben Coleman & Baker [36] festgestellt, dass bei Seitenwind paarweise, konische Wirbel auftreten, die empfindlich auf die Turbulenz reagieren. Die genannten Arbeiten zeigen, dass die Kräfte, die auf das Fahrzeug wirken eindeutig von der Art Anströmung abhängig sind. Daher ist es wichtig, dass die realen Anströmbedingungen bekannt sind und zuverlässig simuliert werden, um deren Auswirkung auf das Fahrzeug möglichst genau bestimmen zu können.

4 Untersuchungsumgebungen

In diesem Kapitel werden die verwendeten Untersuchungsumgebungen und -werkzeuge beschrieben. Diese sind unterteilt in drei Bereiche Fahrversuche, Windkanal und numerische Simulationen. Darin werden das Versuchsfahrzeug, die Fahrzeugmodelle, Teststrecken, Windkanäle und Programme zur numerischen Simulation vorgestellt.

4.1 Fahrversuche

Zur Ermittlung der aerodynamischen Randbedingungen bei Straßenfahrt wird ein Versuchsfahrzeug verwendet. Das Versuchsfahrzeug und die verwendete Messtechnik werden in diesem Abschnitt beschrieben. Ebenso wird der Rundkurs im öffentlichen Straßenverkehr und die verschiedenen Teststrecken vorgestellt. Zuletzt sind die verschiedenen Fahrmanöver die auf den Teststrecken durchgeführt werden definiert.

4.1.1 Versuchsfahrzeug

Zur Untersuchung der instationären An- und Umströmung, die ein Fahrzeug auf öffentlichen Straßen und der Teststrecke erfährt, wurde ein Versuchsfahrzeug mit umfangreicher Messtechnik ausgestattet. Das Versuchsfahrzeug ist damit in der Lage, neben der instationären An- und Umströmung seinen Fahrzustand sowie die Umgebungsbedingungen zu erfassen. Als Versuchsfahrzeug wird ein Fahrzeug aus der Kompaktklasse verwendet. Der VW Golf VII (Modelljahr 2015) wurde von der Volkswagen AG zur Verfügung gestellt und unter Führung des IFS zusammen mit dem DLR mit der im Folgenden beschriebenen Messtechnik und Datenerfassung ausgerüstet. Das 2D-Array wurde dabei vom DLR zur Verfügung gestellt.

Messtechnik

Zu Erfassung der An- und Umströmung werden zwei Vierloch-Strömungssonden (Cobra-Sonden) des Herstellers Turbulent Flow Instrumentation Pty Ltd (TFI) an der Fahrzeugfront und 188 Oberflächendruckmessstellen auf der Karosserie verwendet. Die Cobra-Sonden sind Messinstrumente mit integrierten Sensoren und bieten die Möglichkeit dynamische Strömungssituationen zu erfassen [37]. Mit diesen Strömungssonden ist es möglich die Strömungsgeschwindigkeit in einem Bereich bis 50 m/s und Strömungswinkel im Bereich von $\pm 45^\circ$ mit Frequenzen bis zu 2000 Hz aufzulösen [38–40]. Die Strömungssonden wurden auf beiden Seiten des Frontstoßfängers vor den Scheinwerfern montiert (siehe Abbildung 4-1).

Der Fahrzustand des Fahrzeugs wurde mit vier Abstandssensoren in der Nähe jedes Rades erfasst (siehe Abbildung 4-1). Dies ermöglicht die Bestimmung der Position des Fahrzeugs relativ zum Boden. Ein optischer Sensor (Correvit LFII P) zur Messung der Fahrgeschwindigkeit über Grund wurde im Unterboden des Fahrzeughecks installiert. Zusätzlich wurde ein Satellitennavigationssystem verwendet, um während der Messungen die Fahrzeugposition zu erfassen. Eine in Fahrtrichtung ausgerichtete Kamera zeichnete während der Messungen den Bereich vor dem Fahrzeug mit einer Frequenz von 10 Hz auf.



Abbildung 4-1: Positionierung der Vierloch-Strömungssonden, der Abstandssensoren zu Bestimmung der Fahrzeuglage und des optischen Sensors zur Bestimmung der Geschwindigkeit über Grund am Versuchsfahrzeug [2].

Die Oberflächendrücke wurden an 188 Druckmessbohrungen, wie in Abbildung 4-2 dargestellt, auf der Oberseite der Fahrzeugkarosserie erfasst. Die Druckmessbohrungen sind in die Fahrzeugkarosserie und in eine speziell angefertigte Heckscheibe aus Polycarbonat eingebracht. In die Bohrungen sind kurze Messingröhrchen eingelassen und mit der Fahrzeugoberfläche bündig verschliffen worden. Diese Röhrchen werden mit Schläuche von 1,5 m Länge und 0,7 mm Innenradius mit einem Differenzdruckmesssystem mit vier 32-Kanal- und einem 64-Kanal-Modul verbunden. Um das Übertragungsverhalten zwischen Druckmessstelle und Messsystem zu berücksichtigen, wurden die gemessenen Drücke mit der Übertragungsfunktion des Messaufbaus korrigiert [15, 41, 42].



Abbildung 4-2: Verteilung der Oberflächendruckmessstellen auf dem Versuchsfahrzeug [2].

Die Umgebungstemperatur und die Luftfeuchtigkeit wurden außerhalb des Fahrzeugs gemessen. Mit diesen Parametern kann die Luftdichte der Umgebungsluft ermittelt werden, die für die Berechnung des Druckbeiwerts c_p notwendig ist. Zur zeitsynchronen Datenerfassung aller Geräte wurde ein LabVIEW-Programm verwendet. Die Abtastfrequenz beträgt 250 Hz und nach dem Nyquist-Shannon-Abtasttheorem kann damit ein Frequenzspektrum bis zu 125 Hz untersucht werden [43].

Kalibrierung

Zur Bestimmung der Anströmgeschwindigkeit und des Anströmwinkels wurde das Versuchsfahrzeug nach dem Ansatz ‚Fahrzeug als aerodynamischer Sensor‘ im Aeroakustik-Windkanal der Universität Stuttgart, kalibriert [44–47]. Diese Kalibrierung wird im Folgenden Vorderwagen-Kalibrierung genannt und ermöglicht die Erfassung der Anströmgeschwindigkeit und des Anströmwinkels. Die Messungen wurden in einem Geschwindigkeitsbereich von 19,4-41,7 m/s (70-150 km/h), für Anströmwinkel im Bereich von $\pm 15^\circ$ bei verschiedenen Standhöhen durchgeführt. Zur Erfassung des Anströmwinkels wurden ausgewählte Oberflächendruckmessstellen am Vorderwagen kalibriert. In Abbildung 4-3 (links) ist das Versuchsfahrzeug bei der Kalibrierung im Aeroakustik-Windkanal dargestellt und die Oberflächendruckmessstellen der Vorderwagen-Kalibrierung definiert.



Abbildung 4-3: Versuchsfahrzeug bei der Kalibrierung im Aeroakustik-Windkanal der Universität Stuttgart (links) und die bei der Vorderwagen-Kalibrierung verwendeten Oberflächendruckmessstellen (rechts) [2].

Die Kalibrierung des Vorderwagens basiert auf dem Koeffizient c_{vWK} und wird mit Druckdifferenzen der Oberflächendruckmessstellen P1-P4 (siehe Abbildung 4-3), wie in Gleichung (15) beschrieben, berechnet. Der Koeffizient c_{vWK} setzt den Anströmwinkel in Verhältnis zu den an vier Positionen gemessenen Druckdifferenzen in Quer- und Strömungsrichtung. Für gemessene Oberflächendrucke kann der Anströmwinkel aus den im Windkanal kalibrierten Koeffizienten berechnet werden [45–47].

$$c_{vWK}(\beta) = \frac{P4 - P3}{P2 - P1} \quad \text{Gleichung (15)}$$

Zusätzlich zur Vorderwagen-Kalibrierung, wurde die Oberflächendruckmessstelle P5, siehe Abbildung 4-3, zur Ermittlung der Anströmgeschwindigkeit kalibriert.

Druckmessung

Zur Bestimmung der Druckschwankungen auf der Fahrzeugoberfläche, muss der Referenzdruck des Differenzdruckmesssystems $p_{ref,ms}$ möglichst konstant sein. Daher wurde als Referenzdruck ein geschlossenes Luftreservoir (nahe dem Atmosphärendruck) verwendet. Dieses zeigt eine geringe Schwankebreite und nähert sich einem veränderten Umgebungsdruck zeitlich langsam an. Diese zwei Eigenschaften qualifizieren das Luftreservoir für die Verwendung als Referenzdruck $p_{ref,ms}$. Der Absolutdruck des Luftreservoir und damit der Referenzdrucks $p_{ref,ms}$ wird während jeder Messung mit einem Barometer erfasst. Durch diese Vorgehensweise bietet das System die Möglichkeit automatisch Änderungen der Umgebungstemperatur oder des Umgebungsdrucks zu kompensieren [2].

Die Herausforderung, den Umgebungsdruck während Fahrversuchen auf der Straße zu quantifizieren, ist bekannt [44, 45]. Aus diesem Grund wurde bei der Kalibrierung im Aeroakustik-Windkanal die

Druckmessstelle auf der Oberfläche des Versuchsfahrzeugs mit der geringsten Abweichung zum Umgebungsdrucks p_∞ identifiziert. Darüber hinaus muss die verwendete Oberflächendruckmessstelle eine sehr geringe Empfindlichkeit auf variierende Anströmgeschwindigkeiten und Schräganströmung zeigen um als Referenzmessstelle verwendet zu werden [45].

Bei der beschriebenen Kalibrierung des Versuchsfahrzeuges wurde ein Oberflächendruckmesspunkt ermittelt, der den definierten Anforderungen entspricht und als Referenzdruck p_{ref} verwendet werden kann. In Abbildung 4-3 (rechts) ist die ausgewählte Messstelle, die im hinteren Bereich der Motorhaube mittig positioniert ist, dargestellt. Um Veränderungen des Umgebungsdrucks aufgrund von Änderungen der barometrischen Höhe und des Atmosphärendrucks zu berücksichtigen, wurde der Referenzdruck p_{ref} mit einem Butterworth-Tiefpassfilter zweiter Ordnung mit einer Grenzfrequenz von 1/8 Hz gefiltert. Diese Filterung ist in der Lage, auftretende Schwankungen des Referenzdrucks durch vorausfahrende Fahrzeuge oder Windeinflüsse zu eliminieren und gleichzeitig alle während der Fahrten auftretenden Änderungen des Umgebungsdrucks zu erfassen. Mit Hilfe dieser Methode ist es möglich die Druckverteilung und deren Schwankung auf der Fahrzeugoberfläche messtechnisch zu erfassen.

Fahrzeugarray (2D-Array)

Für die Fahrten auf den Teststrecken wurde das Versuchsfahrzeug – neben der bisher erwähnten Messtechnik zusätzlich mit einem 2D-Array bestehend aus 11 Fünflochsonden ausgestattet (Abbildung 4-4). Mit dem Array wurden die Geschwindigkeitskomponenten vor dem Fahrzeug bestimmt. Die Sondenspitzen waren hierfür 1 m vor dem Fahrzeug mittels Aluminiumstreben positioniert. Der Abstand wurde so gewählt, dass sich die Sonden einerseits möglichst weit entfernt vom Fahrzeug befinden, um eventuelle Störungen durch das Fahrzeug an den Sondenpositionen zu minimieren und andererseits nah genug, um konstruktiv eine stabile, schwingungsfreie Fixierung zu ermöglichen. Ein ähnlicher Kompromiss mit 1 m Abstand vor dem Fahrzeug wurde auch von Wordley [10] und McAuliffe [12] gewählt. Eine zusätzliche Stabilisierung wurde durch Verspannen mit Stahlseilen am Aufbau gewährleistet. Um den Einfluss der Halterung auf die Messung an den Sonden möglichst gering zu halten, wurden die Aluminiumprofile zudem mit aerodynamischen Leisten aus Balsaholz verkleidet, sodass der Querschnitt einem symmetrischen Flügelprofil mit maximaler Dicke von 12 mm entsprach. Die Schläuche und Kabel der Messtechnik wurden in den Aluminiumprofilen untergebracht und beeinflussten die Anströmung somit nicht. Da das Array selbst auch einen Nachlauf erzeugt, der die Oberflächendrücke – insbesondere an der Fahrzeugfront – beeinflusst hätte, wurden die Messungen mit dem Array zur Bestimmung der Anströmung getrennt von den Messungen des Oberflächendrucks durchgeführt. Die Versuchsparameter waren jedoch für beide Messungen identisch.



Abbildung 4-4: Versuchsfahrzeug mit 1 m vor der Front montiertem 2D-Array – bestehend aus 11 Fünflochsonden.

Abbildung 4-5 zeigt ein Modell des Versuchsfahrzeugs. Die Punkte stellen schematisch die Spitzen der Fünflochsonden dar. Die Fünflochsonden wurden symmetrisch zum Fahrzeugmittelschnitt in einem 3-x-3-Raster mit einem Sondenabstand von $\Delta y = 0,98 \text{ m}$ und $\Delta z = 0,6 \text{ m}$, beginnend bei $z = 0,5 \text{ m}$ über dem Boden und 1 m vor der Fahrzeugfront angeordnet. In der unteren Leiste des Arrays wurden noch 2 zusätzliche Fünflochsonden montiert, um die räumliche Auflösung in y -Richtung zu erhöhen. Dadurch ergab sich auf der unteren Ebene ein Abstand von $\Delta y = 0,49 \text{ m}$ zwischen den Sonden.

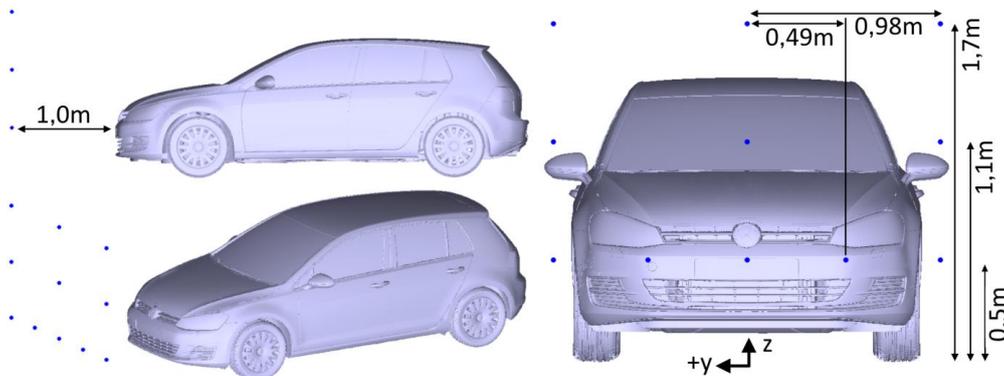


Abbildung 4-5: Messpositionen der Fünflochsonden am Array vor dem Fahrzeug für die Versuche auf den Teststrecken.

Für die Versuche wurden Fünflochsonden der Firma *Vectoflow* mit einem Durchmesser von 3 mm an der 100 mm langen Spitze verwendet. Der kalibrierte Messbereich für die Anströmwinkel in alle Raumrichtungen liegt für diese Sonden bei $\pm 50^\circ$ im Bereich von $3\text{-}100 \text{ m/s}$. Zur Aufzeichnung der Drücke waren die Sonden an ein Sensorsystem *ESP64-HD* der Firma *Pressure Systems* angeschlossen. Die Signale wurden durch ein *DTC Initium* mit 250 Hz aufgezeichnet. Der Messbereich des Systems umfasst $\pm 5000 \text{ Pa}$ mit einer Genauigkeit von $\pm 2 \text{ Pa}$. Die Anströmbedingungen können mit diesem System mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1^\circ$ und $\pm 1 \text{ m/s}$ bestimmt werden. Zur Verbindung der Sonden mit dem Messsystem wurden Silikonschläuche mit einer Länge von $1,5 \text{ m}$ und einem Innendurchmesser von $1,4 \text{ mm}$ verwendet. Die Schlauchmaße entsprechen den Maßen der Schläuche für die Oberflächendruckmessungen (siehe Abschnitt Messtechnik).

4.1.2 Straßenfahrt auf der öffentlichen Autobahn

Mit dem Versuchsfahrzeug wurde ein fester Rundkurs auf öffentlichen Straßen in Süddeutschland mehrmals befahren. Die dabei befahrene Fahrstrecke wird im Folgenden Kompassroute genannt. Die Kompassroute bildet auf der Landkarte einen quadratischen Verlauf nach, wird im Uhrzeigersinn befahren und beginnt an der Universität Stuttgart (siehe Abbildung 4-6). Von dort aus wird über die Autobahn A8 in westlicher Richtung auf die Autobahn A5 in nördlicher Richtung gefahren. Danach wird auf die Autobahn A6 in östlicher Richtung gewechselt um über die Autobahn A81 in südlicher Richtung zurück zum Ausgangspunkt, der Universität Stuttgart, zu fahren.

Die auf der Kompassroute befahrenen Autobahnen sind mehrspurige Straßen mit Geschwindigkeitsbegrenzungen von $16,7 \text{ m/s}$ (60 km/h) bis zu unbegrenzter Geschwindigkeit. Die Versuche wurden mit einer definierten Höchstgeschwindigkeit von $38,9 \text{ m/s}$ (140 km/h) durchgeführt und die Fahrweise entsprach den gesetzlichen Vorschriften im Straßenverkehr. Dabei wurde insbesondere darauf geachtet, den gesetzlichen Mindestabstand zu anderen Verkehrsteilnehmern einzuhalten.

Das Gelände rund um die Kompassroute ist vielfältig und umfasst die in Deutschland üblichen Straßenbegrenzungen. Neben dem repräsentativen Gelände umfassen die Messungen einen Großteil der auftretenden Fahrsituationen, die ein Fahrzeug während der Fahrt auf der Autobahn erfährt. Aus diesem Grund werden die Messungen als repräsentatives Kollektiv verwendet.



Abbildung 4-6: Die in Süddeutschland gelegene und in Stuttgart beginnende Kompassroute mit eingezeichneter Fahrtrichtung und die Lage der berücksichtigten Wetterstationen der vier markierten Flughäfen [48].

Zusätzlich wurden die Tests unter vergleichbaren Wetterbedingungen mit durchschnittlichen Windgeschwindigkeiten von 2-5 m/s durchgeführt. Es gab keine Regenfälle und die Straßen waren während der Tests trocken. Die Temperatur der Umgebungsluft lag im Bereich von $20 \pm 5 \text{ °C}$ mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von $50 \pm 10 \text{ %}$ und einem Luftdruck auf Meereshöhe von $1020 \pm 4 \text{ hPa}$.

Die für diesen Vergleich verwendeten Wetterdaten wurden aus den Wetterinformationen von Flughäfen in der Nähe der Fahrstrecke ermittelt. Dies waren der Stuttgarter Flughafen (EDDS), der Baden Airpark (EDSB), der City Airport Mannheim (EDFM) und der Flugplatz Niederstetten (ETHN). Die geografische Lage der Wetterstationen ist in Abbildung 4-6 dargestellt.

Die Windverhältnisse während der Versuche stimmen mit der durchschnittlichen in der Bundesrepublik Deutschland vorherrschenden Windgeschwindigkeit überein. Die Windkarte mit den mittleren Windverhältnisse der letzten Dekaden in Deutschland ist in Abbildung 4-7 dargestellt.

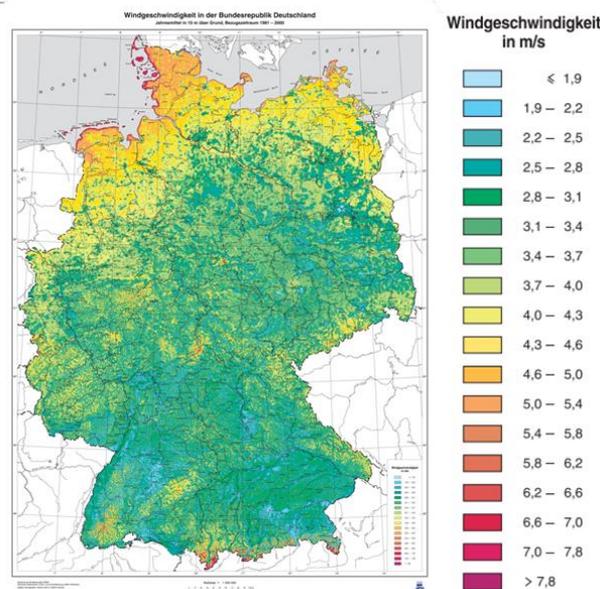


Abbildung 4-7: Windkarte – Windgeschwindigkeiten in der Bundesrepublik Deutschland 10 m über Grund im Jahresmittel, Bezugszeitraum 1981 – 2000 [49].

Die Höhe der Wetterstationen der Flughäfen und der Messstationen der Windkarte liegen in der gleichen Größenordnung und bieten aus diesem Grund eine zuverlässige Vergleichsgrundlage. Die Windgeschwindigkeiten auf Höhe eines PKW im Straßenverkehr können aufgrund der atmosphärischen Bodengrenzschicht jedoch geringer ausfallen.

4.1.3 Individuelle Fahrmanöver

Für die Straßenfahrten (Kapitel 5.1) wurden die mittleren statistischen Strömungsbedingungen im öffentlichen Verkehr zur Ermittlung der Anströmung und der Druckverteilung am Versuchsfahrzeug betrachtet. Auf Grund der zahlreichen Einflussfaktoren (z.B. Verkehrsdichte, variierende Fahrgeschwindigkeiten, Wetter, Straßenrandobjekte) sind die Anströmbedingungen für instationäre, individuelle Fahrmanöver weder direkt reproduzierbar noch eindeutig von zuvor genannten Einflussfaktoren trennbar. Daher wurden auf Teststrecken beim DLR in Trauen und bei BMW in Aschheim Experimente für ausgewählte Fahrmanöver durchgeführt. Der Vorteil dieser Versuchseinrichtungen liegt darin, dass dort kontrollierte, ungestörte und reproduzierbare Versuchsbedingungen ermöglicht werden können. Des Weiteren konnte zur detaillierten Bestimmung der Geschwindigkeitskomponenten in der Anströmung vor dem Fahrzeug das aus 11 Fünflochsonden bestehende Array verwendet werden. Im Straßenverkehr wurde das Array auf Grund von sicherheitstechnischen Bedenken nicht verwendet.

Auf beiden Teststrecken wurden die aktuellen Wetterbedingungen (Temperatur, Druck, Windgeschwindigkeit und -richtung) mittels einer Wetterstation in 2 m Höhe mit einer Abtastrate von 0,1 Hz zur Kontrolle während der Versuche aufgezeichnet. Die Windgeschwindigkeiten lagen üblicherweise bei ca. 3 m/s, was der durchschnittlichen Windgeschwindigkeit in großen Teilen Deutschlands entspricht (Deutscher Wetterdienst [49]) und somit als repräsentativ angesehen werden kann. Um Richtungsabhängigkeiten zu minimieren, wurden die Versuche auf den Teststrecken immer in die 2 entgegengesetzten Himmelsrichtungen Ost und West durchgeführt.

DLR-Teststrecke Trauen

Mit der DLR-Teststrecke nahe Trauen (Abbildung 4-8) stand eine 3 km lange und 25 m breite Landebahn für die Versuche zur Konstant- und Hinterherfahrt sowie für die Überholmanöver zur Verfügung. Da im Vorfeld die exklusive Nutzung der Landebahn vereinbart werden konnte, waren keine zusätzlichen Verkehrsteilnehmer außer den Versuchsfahrzeugen auf der Teststrecke. Es gab zudem keine nennenswerten Streckenrandobjekte und der Abstand zum umliegenden Wald sowie zu den Flughafengebäuden betrug mehr als 200 m. Die unmittelbar an die Teststrecke angrenzende Fläche bestand aus einer Wiese, die nur gelegentlich von den Rollwegen des Fluggeländes unterbrochen war.



Abbildung 4-8: Satellitenansicht der als Teststrecke genutzten Landebahn mit den zugehörigen Rollwegen beim DLR Trauen mit einer Länge von 3 km und 25 m Breite sowie mindestens 200 m direkt angrenzendem flachen Rasenbewuchs [50].

BMW-Teststrecke Aschheim

Die Versuche zu impulsartigen Seitenwinden wurden auf der BMW-Teststrecke in Aschheim durchgeführt. Auf einer geraden Strecke von 830 m Länge befand sich mittig eine 30 m lange Seitenwindanlage (Abbildung 4-9). Die Seitenwindanlage besteht aus 10 Gebläsen, jeweils mit einem Durchmesser von 2 m. Mit dem Array des Versuchsfahrzeugs wurde die Strömungsqualität gemessen, indem das Fahrzeug senkrecht zu den Gebläsen mit 1 m Abstand positioniert wurde. Die mit den Gebläsen erzeugten Seitenwinde v_w erreichen Geschwindigkeiten zwischen 13,9 m/s und 22,2 m/s. Die gemessenen Turbulenzintensitäten in der Strömung liegen dabei bei 3,4 % für eine Geschwindigkeit von 22,2 m/s und bei 6 % für eine Geschwindigkeit von 13,9 m/s. Entlang der Messstrecke ergibt sich eine Gleichförmigkeit der Geschwindigkeit von $\pm 10\%$. Um den Zeitpunkt der Ein- und Ausfahrt in den bzw. aus dem Seitenwind an der Anlage reproduzierbar bestimmen zu können, wurden 2 Reflektoren (LG1 und LG2) in einem Abstand von 18 m verwendet. Die Reflektoren lösten an der im Fahrzeug mitgeführten Lichtschranke ein Signal aus. Die Fahrbahn ist ca. 5 m breit. Das vorbeifahrende Versuchsfahrzeug passierte die Seitenwindanlage in einem Abstand von ca. 1 m entlang einer weißen Markierung (in Abbildung 4-9 oben rechts).

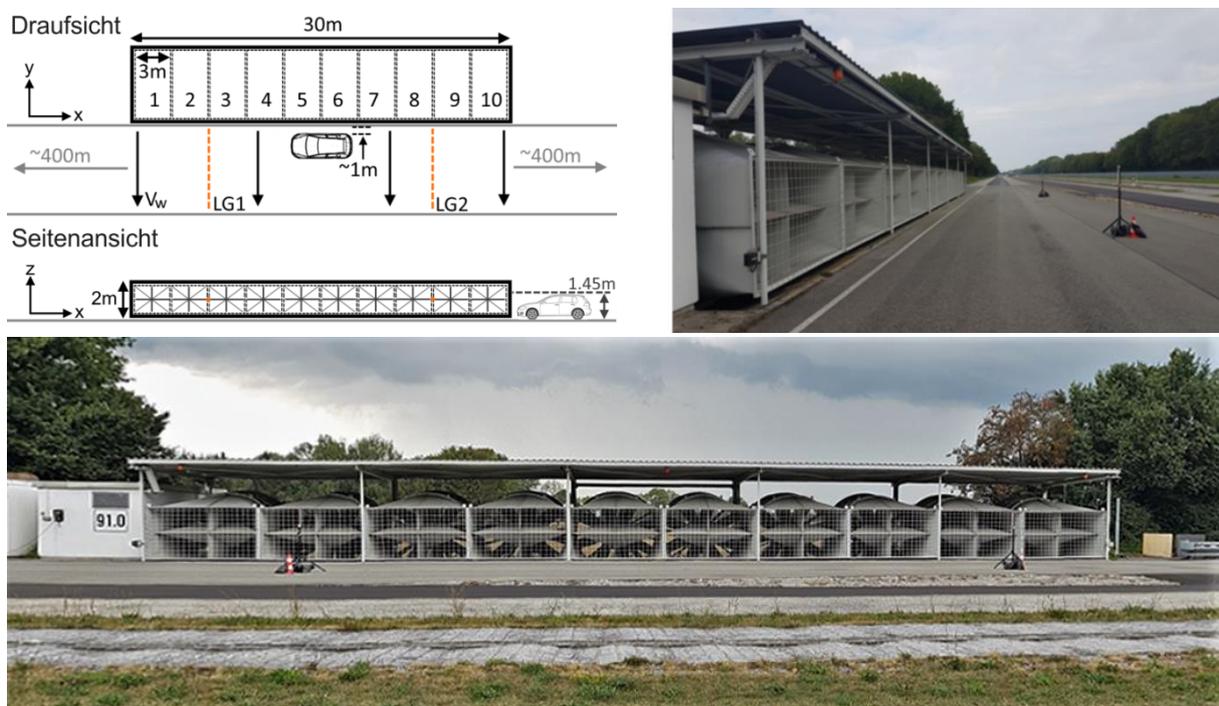


Abbildung 4-9: Seitenwindanlage der BMW-Teststrecke Aschheim: Skizze der Anlage mit Versuchsfahrzeug (oben links), Anlage mit Beschleunigungsstrecke und angrenzender Baumreihe (oben rechts) und Seitenansicht des 30 m langen Seitenwindbereichs mit 10 Einzelgebläsen (unten) mit seitlich angrenzendem Baumbewuchs.

Die an die Seitenwindanlage angrenzenden 400 m langen Streckenabschnitte sind durch seitlichen Baumbewuchs windgeschützt und konnten somit als Beschleunigungs- bzw. Bremsbereiche genutzt werden (Abbildung 4-9, oben rechts und unten). Während der Versuche befanden sich keine anderen Fahrzeuge im Bereich der Seitenwindanlage, um einen möglichen Einfluss auf die Versuchsergebnisse auszuschließen.

Übersicht der individuellen Fahrmanöver

Auf den Teststrecken wurden folgende, individuelle Fahrmanöver durchgeführt, die typische Verkehrssituationen widerspiegeln:

- **Konstantfahrt (KF):** Die Konstantfahrt ohne weitere Verkehrsteilnehmer diente als Referenz für die Versuche auf der Straße und die Hinterherfahrten auf der Teststrecke. Das Versuchsfahrzeug wurde hierfür mit konstanten Geschwindigkeiten v_F (22,2; 27,8; 33,3; 38,9 m/s) über die Länge der Teststrecke bewegt. Die Messzeit betrug je nach Fahrgeschwindigkeit bis zu 120 s. Die Messungen wurden für jede Geschwindigkeit mindestens 10-mal wiederholt.
- **Hinterherfahrt (HF):** Die Hinterherfahrt stellte eine Fahrt hinter einem zweiten Fahrzeug bei konstanter Geschwindigkeit v_F in gleichbleibendem Abstand Δx dar (Abbildung 4-10). Der Abstand war definiert als die Distanz zwischen der Hinterkante des vorausfahrenden Fahrzeugs und der Front des Versuchsfahrzeugs. Für die Versuche wurden dabei sowohl die Abstände als auch Geschwindigkeiten variiert.



Abbildung 4-10: Hinterherfahrt des Versuchsfahrzeugs mit einem Abstand von 10 m zum Transporter mit Kofferaufbau.

Zusätzlich wurde in Versuchen neben einem Transporter mit Kofferaufbau noch ein Kombi als vorherfahrendes Fahrzeug verwendet. Auf letzteren soll in diesem Bericht jedoch nicht weiter eingegangen werden, da die Ergebnisse nicht weiter für die Windkanaluntersuchungen genutzt wurden. Die Messzeit betrug abhängig von der Fahrgeschwindigkeit v_F zwischen 80 s und 100 s. Jede HF-Messung wurde mindestens 8-mal wiederholt. Tabelle 4-1 zeigt eine Übersicht der untersuchten Parameter.

Tabelle 4-1: Übersicht der untersuchten Parameter für die Hinterherfahrt.

v_F / m/s	Δx / m	2. Fahrzeugtyp
22,2	10, 20, 30, 50, 100	Transporter mit Kofferaufbau, Kombi
27,8	10, 20, 30, 50, 100	Transporter mit Kofferaufbau, Kombi
33,3	10, 20, 30, 50, 100	Transporter mit Kofferaufbau, Kombi
38,9	10, 20, 30, 50, 100	Kombi

- **Überholmanöver (ÜM):** Das Überholmanöver stellt die Vorbeifahrt an einem zweiten, vorherfahrenden Fahrzeug nach. Das Versuchsfahrzeug startet mit großem Abstand (> 200 m) auf der Spur links von dem zu überholenden Fahrzeug. Das mit konstanter Geschwindigkeit vorausfahrende Fahrzeug wird mit dem durchgängig auf der linken Spur fahrenden Versuchsfahrzeug bei gleichbleibend gehaltener Differenzgeschwindigkeit überholt (Abbildung 4-11). Zum Positionsabgleich der Messungen untereinander wurden Lichtschranken verwendet. Der Sensor war am Rückfenster des Versuchsfahrzeugs montiert. Die Messungen mit dem Sensor wurden durch 2 reflektierende Streifen am vorausfahrenden Fahrzeug ausgelöst. Der erste Streifen befand sich direkt an der Heckkante, der zweite Streifen direkt an der Vorderkante des Kofferaufbaus.



Abbildung 4-11: Überholmanöver von einem Transporter mit Kofferbau auf der linken Spur.

Der bekannte Abstand konnte außerdem verwendet werden, um die reale Relativgeschwindigkeit zwischen den beiden Fahrzeugen zu bestimmen. Jedes Überholmanöver wurde mindestens 2-mal, die meisten jedoch mehr als 10-mal wiederholt. Tabelle 4-2 zeigt eine Übersicht der untersuchten Parameter.

Tabelle 4-2: Übersicht der untersuchten Parameter für das Überholmanöver.

v_F / m/s	Δv_F / m/s	Fahrzeugtypen
25,0	27,8	Transporter mit Kofferaufbau, Kombi
27,8	20	
33,3	20, 40	

- Impulsartiger Seitenwind:** Für die Versuche bei impulsartigem Seitenwind wurde von BMW die Seitenwindanlage in Aschheim zur Verfügung gestellt. Der Fokus der Versuche lag in der Variation des Anströmwinkels β bei unterschiedlichen Kombinationen aus Fahr- (v_F) und Seitenwindgeschwindigkeiten (v_w) bei einem Abstand von 1 m von der Auslassseite der Seitenwindanlage. Die Seitenwindanlage konnte mit 13,9 m/s bzw. 22,2 m/s betrieben werden. Die Fahrgeschwindigkeiten wurden entsprechend angepasst. Jede Versuchskonfiguration wurde mindestens 10-mal wiederholt, wobei bei jedem Versuch sämtliche Messdaten für ca. 30 s aufgezeichnet wurden. Diese beinhalteten neben dem Bereich an der Seitenwindanlage auch Zeitabschnitte im Beschleunigungs- und Bremsbereich. Tabelle 4-3 zeigt eine Übersicht der untersuchten Parameter.

Tabelle 4-3: Übersicht der Untersuchungsparameter an der BMW-Seitenwindanlage.

v_F / m/s	v_w / m/s	β / °
33,3	13,9	22
29,7	13,9	25
24,2	13,9	30
19,7	13,9	35
13,9	13,9	45
31,7	22,2	35
22,2	22,2	45



Abbildung 4-12: Versuchsfahrzeug vor der Seitenwindanlage (BMW Aschheim).

4.2 Windkanäle und Fahrzeugmodelle

In dem vorgestellten Forschungsprojekt werden verschiedene Windkanäle und Fahrzeugmodelle eingesetzt. Es wurden sowohl Messungen im 1:1 Maßstab als auch im Maßstab 1:4 und 1:10 durchgeführt. Für die Untersuchungen in diesen Maßstäben wurden verschiedene Fahrzeugmodelle verwendet. Zusätzlich konnten Untersuchungen in Windkanälen mit geschlossener und offener Messstrecke durchgeführt werden. Alle Windkanäle sind im Folgenden detailliert beschrieben.

4.2.1 Modellwindkanal der Universität Stuttgart

Der vom FKFS betriebene 1:4-Modellwindkanal (MWK) der Universität Stuttgart ist ein Windkanal mit offener Messstrecke (Göttinger Bauart) und horizontaler Luftführung. Die maximale Strömungsgeschwindigkeit beträgt 80 m/s, bei einer Gebläseleistung von 335 kW. Zur Simulation der Fahrt auf der Straße, bei der die Strömungsgeschwindigkeit in vertikaler Richtung einem Blockprofil gleicht, ist ein 5-Band-System mit Grenzschichtabsaugung und tangentialen Ausblasungen installiert.

Zusätzlich zu klassischen Windkanalmessungen, bei denen eine stationäre und turbulenzfreie Strömung gefordert wird, können im MWK mit dem optional verfügbaren FKFS *swing*[®]-System auch instationäre Strömungszustände dargestellt werden. Es ermöglicht die Untersuchung von Fahrzeugmodellen im transienten Strömungsfeld und beeinflusst das Strömungsfeld dynamisch. Dabei wird die Strömung in y-Richtung mit sechs, aus Kohlefaser gefertigten und in der Düsenaustrittsebene montierten, Flügelprofilen ausgelenkt. Die Flügel werden synchron bewegt und können Anströmwinkel von bis zu $\pm 10^\circ$ und Frequenzen bis zu 12 Hz darstellen [21]. Zeitdiskrete Signale werden dabei als Eingang verwendet. Es können neben sinusförmigen Signalen ebenso Anströmwinkel aus Straßenmessungen oder generisch erstellte Signale mit dem System abgebildet werden. In Abbildung 4-13 ist die Messstrecke des Modellwindkanals mit dem installierten FKFS *swing*[®]-System und dem im Forschungsprojekt verwendeten Fahrzeugmodell FAT Golf im Maßstab 1:4 dargestellt.



Abbildung 4-13: FAT Golf Fahrzeugmodell im Maßstab 1:4 im Modellwindkanal der Universität Stuttgart mit 5-Band-System und FKFS *swing*[®] in der Düsenaustrittsebene.

Die Messungen im Modellwindkanal der Universität Stuttgart wurden mit einer Anströmgeschwindigkeit von 50 m/s durchgeführt. Alle Messungen wurden mit drehenden Rädern und aktiver Bodensimulation durchgeführt. Die Messergebnisse des Luftwiderstandsbeiwerts werden, nach dem Stand der Technik, mit der sogenannten *Two Measurement Correction* [51] korrigiert.

Fahrzeugmodelle

Das Fahrzeugmodell des Versuchsfahrzeugs wurde größtenteils mit den am IFS zur Verfügung stehenden 3D-Druckern und Fertigungsmaschinen gefertigt. Die verschiedenen Komponenten des Fahrzeugmodells FAT Golf 1:4 sowie dessen Aufbau ist in Abbildung 4-15 dargestellt. Das Modell besitzt im Gegensatz zum 1:1 Versuchsfahrzeug keine Motorraumdurchströmung. Die Basis des Modells ist eine Grundplatte aus Aluminium, die als tragende Struktur im Modell verbaut ist. An dieser sind sowohl die Befestigungen für die Schwellerstützen, zur Fixierung des Fahrzeugmodells an der Windkanalwaage, als auch die höhenverstellbaren und drehbaren Räder montiert. Auch der obere Teil des Fahrzeugkorpus, der mit 128 Oberflächendruckmessstellen versehen ist, ist an der Grundplatte angebracht. Vollständig ist das Fahrzeugmodell nach dem Einsetzen des Unterbodens und Anbringen der Anbauteile (Abgasanlage, Hinterachse, Radspoiler, Außenspiegel).

Die Sensoren zur Erfassung der Oberflächendrucke sind im inneren des Fahrzeugmodells untergebracht. Über Kabel, die im Bereich hinter dem rechten Hinterrad aus der Fahrzeuggeometrie geführt werden, wird die Signalübertragung gewährleistet. Die Standhöhe des Fahrzeugmodells wurde entsprechend der durchschnittlichen Standhöhe der Fahrversuche eingestellt.

Die Geometrie der Felge, des Reifens und der Radkappe des 1:1 Versuchsfahrzeugs wurden mit einem optischen 3D-Geometriescanner erfasst. Für die Fertigung des 1:4 Modells wurde die Wandstärke der Felgen im Bereich des Felgensterns vergrößert, um die nötige Steifigkeit der Felge sicherzustellen. Die Kontur des Reifens wurde mit einer vereinfachten Profilierung, die aus 3 längsumlaufenden Nuten besteht, versehen. Der aus Felge und Reifen bestehende Zusammenbau ist als ein Aluminiumbauteil gefertigt und wird mit einer Radkappe aus dem 3D-Drucker kombiniert. Die Räder des Fahrzeugmodells werden gleichermaßen in den numerischen Simulationen verwendet und sind in Abbildung 4-14 (rechts) abgebildet.



Abbildung 4-14: Detailansicht der in der Simulation verwendeten Geometrien des geschlossenen Vorderwagens des VW Golf VII (links) und des vereinfachten Rades mit detaillierter Radkappe (rechts).

Die Geometrie des geschlossenen Vorderwagens ist in Abbildung 4-14 (links) veranschaulicht. Dieser ist sowohl in den numerischen Simulationen als auch für das Fahrzeugmodell verwendet worden. Im Folgenden wird das Fahrzeugmodell des VW Golf VII Versuchsfahrzeugs nur noch als FAT Golf 1:4 bezeichnet.

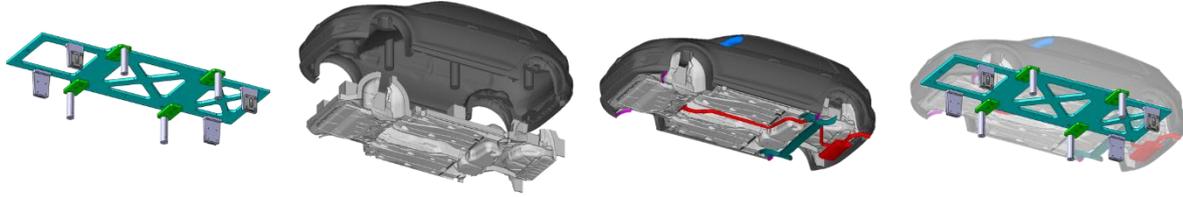


Abbildung 4-15: Aufbau des FAT Golf 1:4 Fahrzeugmodells auf der Aluminium-Grundplatte mit Schwenkerstützen- und Radaufnahmen; Außenhaut, Unterboden und Anbauteile aus dem 3D-Drucker.

Neben dem FAT Golf 1:4 wird das generische Fahrzeugmodell AeroSUV für verschiedene Voruntersuchungen verwendet [52, 53]. Der AeroSUV ist ein am FKFS entwickeltes, generisches Fahrzeugmodell, das auf dem DrivAer [54, 55] basiert. Das Fahrzeugmodell ist Modular aufgebaut und besitzt neben der Möglichkeit, verschiedene Heckaufsätze zu montieren, auch die Möglichkeit die Motorhaube und Frontstoßstange auszutauschen. Der AeroSUV ist in Abbildung 4-16 (links) bei Messungen im Modellwindkanal der Universität Stuttgart dargestellt.



Abbildung 4-16: Verschiedene Ansichten des AeroSUV im Modellwindkanal der Universität Stuttgart (links) und die Verteilung der Oberflächendruckmessstellen auf dem Fahrzeugmodell (rechts).

Mit Rapid Prototyping Bauteilen konnten Oberflächendruckmessstellen äquivalent zum Versuchsfahrzeug der Fahrversuche am AeroSUV Fahrzeugmodell an der Frontstoßstange und Motorhaube umgesetzt werden. Ergänzend konnte ein bereits vorhandener Heckaufsatz (Kombiheck) mit integrierten Oberflächendruckmessstellen eingesetzt werden. In Abbildung 4-16 (rechts) sind die Druckmessstellen auf der Oberfläche des AeroSUV skizziert.

4.2.2 Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal der Universität Stuttgart

Der Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal (FWK) der Universität Stuttgart wird wie der Modellwindkanal seit 1989 vom FKFS betrieben und wurde über die Jahre stetig weiterentwickelt, um immer mindestens dem Stand der Technik zu entsprechen. Im FWK können durch ein Gebläse mit 3.3 kW Antriebsleistung Windgeschwindigkeiten von bis zu 72 m/s erreicht werden. Ein 5-Band-System mit verschiedenen Grenzschichtabsaugungen und einer tangentialen Ausblasung simuliert, ähnlich wie im MWK, die Fahrt auf der Straße und gewährleistet optimale Strömungsqualität. Durch die aeroakustische Auskleidung

des Windkanals und dass in der Düse installierte FKFS *best*[®]-System ist der Windkanal besonders geräuscharm und unterdrückt niederfrequente Pulsationen des Freistrahls sehr effizient.

Das FKFS *swing*[®]-System kann, wie auch im MWK, in den Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal installiert werden [15, 22, 56]. Es besteht im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal aus acht symmetrisch angeordneten Flügelprofilen vertikal im Düsenausgang angebracht sind. Wie im Modellwindkanal werden die Flügel synchron ausgelenkt und es können verschiedene sinusförmige Signale, Anströmwinkel aus Fahrversuchen oder generische Signale abgebildet werden. Abbildung 4-17 zeigt die Messstrecke des FWK mit dem Versuchsfahrzeug Volkswagen Golf VII und installiertem FKFS *swing*[®]-System. Auf der Oberfläche des Versuchsfahrzeugs sind bei genauer Betrachtung die Positionen der Oberflächendruckmessstellen zu erkennen.

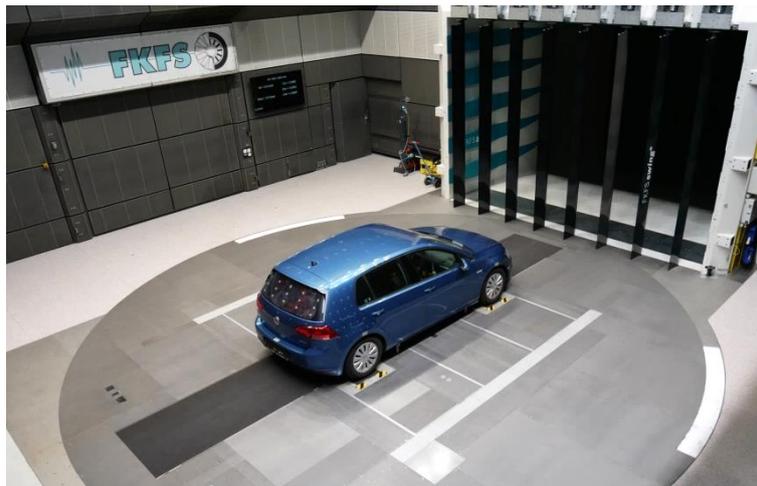


Abbildung 4-17: Versuchsfahrzeug VW Golf VII im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal der Universität Stuttgart mit 5-Bandsystem und FKFS *swing*[®] in der Düsenaustrittsebene.

Die Messungen im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal werden im Rahmen dieser Arbeit mit einer Anströmgeschwindigkeit von 27,8 m/s durchgeführt. Die Ergebnisse der Messungen des Luftwiderstandsbeiwerts im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal werden genauso wie im Modellwindkanal (siehe Abschnitt 4.2.1) mit der *Two Measurement Correction* Methode [51] korrigiert.

4.2.3 Seitenwindversuchsanlage Göttingen des DLR

Die instationären Simulationen der individuellen Fahrmanöver – Hinterherfahrt und Überholmanöver – wurden in der Seitenwindversuchsanlage Göttingen (SWG) durchgeführt. Bei der SWG handelt es sich um einen Unterschallwindkanal Göttinger Bauart. Der Kanal besitzt eine 2,4 m breite, 1,6 m hohe und 9 m lange Messstrecke und ermöglicht Strömungsgeschwindigkeiten von bis zu $u_\infty = 65$ m/s. Zur realistischen Simulation der Fahrzeugbewegung über dem Boden verfügt die SWG über ein 4 m langes und 1 m breites Laufband mit aktiver und passiver Grenzschichtabsaugung. Am Ende der Messstrecke sind Öffnungen zum Druckausgleich eingelassen. Die Versuche wurden bei einer Strömungsgeschwindigkeit von $u_\infty = 30$ m/s \pm 0,2 m/s durchgeführt.

Aktives Klappensystem

Um die auf den Teststrecken gemessenen Strömungsbedingungen sowohl in ihren statistischen Größen (z.B. Turbulenzintensitäten und integrale Längenskalen) als auch in Form des zeitlich veränderten Anströmwinkels simulieren zu können, wurde ein aktives Klappensystem verwendet. Dieses besteht aus 4 symmetrischen 0018 NACA-Profilen mit Flaps, wobei die Flügel 0,5 m hinter dem Düsenanlass am Boden fixiert wurden. Wie in Abbildung 4-18 dargestellt sind die Flaps am hinteren Teil des Flügels

hingegen beweglich gelagert. Die Verwendung von beweglichen Flaps hat laut Jones & Moore [57] den Vorteil, dass die Ablösung der Strömung im Vergleich zu beweglichen Flügeln verzögert wird. Zusätzlich können die aus Kohlefaser gefertigten Flaps aufgrund des geringeren Eigengewichtes und der dadurch geringeren Trägheit gegenüber dem kompletten Flügel schneller bewegt werden. Abbildung 4-18 zeigt die symmetrische Anordnung der Flügel entlang der Breite des Windkanals. Die Flügeltiefe c beträgt 0,3 m, wobei die Flaps ein Drittel der Flügeltiefe einnehmen. Die maximal mögliche Amplitude der Flaps beträgt derzeit $\beta_{\text{flap,max}} = \pm 20^\circ$. Auf Grund der geschlossenen Kanalgeometrie war die Bewegung der Strömung in der Querrichtung begrenzt. Um eine Ausgleichsmöglichkeit zu schaffen, beträgt die Flügelhöhe 0,8 m – was der halben Kanalhöhe entspricht. Dadurch konnte die Strömung in der oberen Hälfte des Kanals rezirkulieren. Zugleich ist diese Höhe ausreichend, um die Strömung über die gesamte Modellhöhe gleichmäßig zu beeinflussen. Die Flaps sind zudem individuell um den Drehpunkt mit bis zu 50Hz bei $\beta_{\text{flap,max}} = \pm 5^\circ$ beweglich.

Die Ansteuerung der Flaps des aktiven Klappensystems erfolgt über eine direkte Kupplung der Drehachse mit einem Servomotor. Dessen zeitlicher Winkelverlauf kann mittels eines TwinCAT-Programms in Zeitschritten von bis zu $\Delta t = 0,001$ s vorgegeben werden.

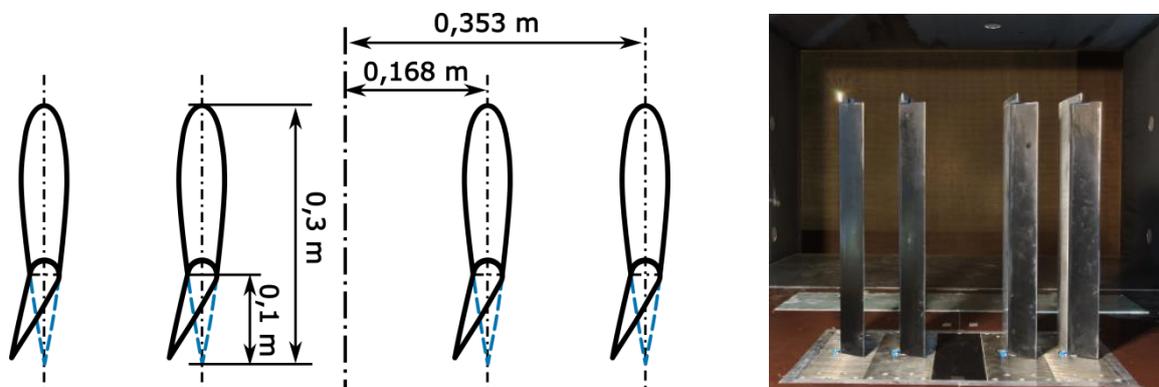


Abbildung 4-18: Links: Größe und Position der Flügel und Flaps im Windkanal mit neutralen (blau) und angewinkelten (blau) Flaps. Rechts: Klappensystem in der Messstrecke nahe des Düseninlasses.

Die gezielte Beeinflussung der Turbulenzintensitäten und der integralen Längenmaße sowie der zeitlich veränderlichen Anströmwinkel in der Anströmung setzt die Kenntnis der Transferfunktionen zwischen der Flapbewegung und dem Anströmwinkel im Kanal an der Fahrzeugposition für unterschiedliche Flapwinkel β_{flap} und Flapfrequenzen f_{flap} voraus. Um eine Transferfunktion zwischen Flap- und Strömungswinkel zu bestimmen, wurden die Flaps parallel mit einer sinusförmigen Bewegung zwischen $0^\circ < \beta_{\text{flap}} < 20^\circ$ bei 10 Hz angesteuert. Der zugehörige Strömungswinkel wurde mit Fünflochsonden über eine Breite von 0,7 m in der leeren Messstrecke 0,25 m vor der theoretischen Fahrzeugposition bestimmt. Abbildung 4-19 (links) zeigt den ermittelten Zusammenhang zwischen Flap- (x-Achse) und Strömungswinkel (y-Achse). Die eingetragenen Messwerte (blaue Kreuze) verdeutlichen, dass die Strömungswinkel kleiner als die zugehörigen Flapwinkel sind und dass der maximale Strömungswinkel von $\beta = 6,5^\circ$ bei einem Flapausschlag von $\beta_{\text{flap}} = 20^\circ$ erreicht wird. Die Transferfunktion zwischen den beiden Winkeln erweist sich im überprüften Bereich als nahezu linear. Die Transferfunktion zwischen der Flapfrequenz f_{flap} und dem Strömungswinkel β wurde für eine sinusförmige Flapbewegung bei einer maximalen Amplitude von $\beta_{\text{flap}} = 10^\circ$ bestimmt. Hierzu wurde ein Frequenzbereich von 1 Hz - 30 Hz überprüft. Abbildung 4-19 (rechts) zeigt auf der Abszisse die Anregungsfrequenz f_{flap} und auf der Ordinate den zugehörigen Strömungswinkel β , der mit zunehmender Frequenz abnimmt. Das Verhalten kann mit einem Polynom 3. Grades beschrieben werden. Mit so gewonnen 2 eindimensionalen Transferfunktionen kann das gewünschte Zielsignal für $\beta(t)$ in der Strömung nun im Spektrum korrigiert werden.

Führt man das korrigierte Spektrum jetzt zurück in ein Zeitsignal, so erhält man den benötigten Zeitverlauf des Flapwinkels $\beta_{\text{flap}}(t)$.

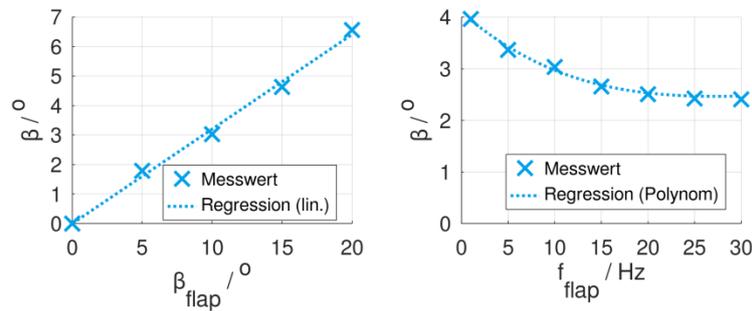


Abbildung 4-19: Zusammenhang zwischen dem Strömungs- und dem Flapwinkel β_{flap} bei 10 Hz (links) bzw. der Flapfrequenz f_{flap} bei einer Amplitude von 10° (rechts) nahe der Fahrzeugposition in leerer Messstrecke.

Passive Turbulenzgeneratoren

Um die Turbulenzintensität der Anströmung im Windkanal zu erhöhen, wurde optional ein zusätzliches System aus passiven Turbulenzgeneratoren (TG) direkt hinter der Einlassdüse montiert (grüne Rechteckzylinder in Abbildung 4-20). Dabei handelte es sich um rechteckige Zylinder, die von der Kanalmitte aus gleichmäßig über die Breite installiert waren. Zur Einstellung einer gewünschten Abstufung der Turbulenzintensität, wurde nach Roache [58] die Breite der Zylinder und deren Anzahl in der Messstrecke angepasst. In beiden Fällen erstreckten sich die passiven Turbulenzgeneratoren über die gesamte Höhe des Kanals.

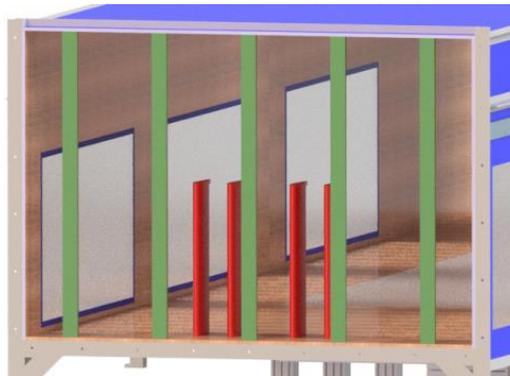


Abbildung 4-20: Ansicht stromabwärts in die Messstrecke mit den großen passiven Turbulenzgeneratoren (grüne Elemente) am Düsenauslass und dem aktiven Klappensystem dahinter.

Im Weiteren werden die schmalere Zylinder als „klein“ passiver Turbulenzgenerator bezeichnet. Dabei handelt es sich um quadratische Zylinder aus Aluminium mit einer Breite von 0,04 m. Durch Montage dieser quadratischen Zylinder mit einem Abstand zwischen den Mittellinien der Zylinder von 0,2 m konnten 11 äquidistante Elemente in der Messstrecke montiert werden (siehe Abbildung 4-21 oben).

Das 2. Setup wird als „groß“ passiver Turbulenzgenerator bezeichnet. Hierfür wurde im Vergleich zum Aufbau mit den „kleinen“ Turbulenzgeneratoren jeder zweite quadratische Zylinder von der Mitte ausgehend entfernt. Damit ergaben sich Abstände von 0,4 m zwischen den Zylindern. Die Breite der Zylinder wurde durch das Anbringen von Holzplatten auf der strömungszugewandten Seite des quadratischen Zylinders auf 0,08 m erhöht (siehe Abbildung 4-21 unten).

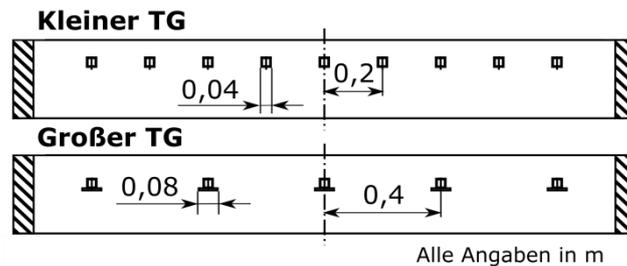


Abbildung 4-21: Breite der quadratischen Zylinder quer zur Strömungsrichtung und Verteilung der Zylinder über die Breite der Teststrecke für den kleinen (oben) und den großen (unten) Turbulenzgenerator (Anströmrichtung von unten nach oben). Unten: Montierte Platte vor den Zylindern zur Erhöhung der Breite der Turbulenzgeneratoren.

Fahrzeugmodell

Bei dem in Abbildung 4-22 dargestellten Windkanalmodell – das für die Versuche verwendet wurde – handelt es sich um ein 1:4-Modell des Versuchsfahrzeugs (VW Golf VII Blue Motion) mit einer Länge von $l = 1,06$ m, einer Breite von $b = 0,52$ m und einer Höhe von $h = 0,36$ m. Das Fahrzeug wurde im Windkanal so positioniert, dass die Front 2,5 m Abstand von der Flügelhinterkante hatte. Die Windkanalversuche wurden bei einer Geschwindigkeit von 30 m/s durchgeführt, woraus eine Reynolds-Zahl gebildet mit der Fahrzeuglänge l von $Re_l = 1,8 \cdot 10^6$ resultiert. Dies liegt über der von Hucho [59] beschriebenen Reynolds-Zahl von 10^6 , ab der für einen stumpfen Körper in Form eines Zylinders Reynolds-Zahl-Unabhängigkeit angenommen werden kann. Um die Reynolds-Zahl-Unabhängigkeit zu überprüfen, wurden Widerstandsmessungen zwischen $u_\infty = 27$ m/s und 35 m/s durchgeführt. Im Bereich der Reynolds-Zahl von $1,6 \cdot 10^6 < Re_l < 2,1 \cdot 10^6$ wurde eine Veränderung des Widerstandsbeiwerts $\Delta c_w = 0,001$ gemessen. Diese Änderung liegt im Bereich der Genauigkeit des Messsystems und ist somit vernachlässigbar. Die Reynolds-Zahl-Unabhängigkeit konnte darüber hinaus durch den Vergleich mit den Kanalmessungen im Maßstab 1:1 bestätigt werden. Die Abweichung betrug hier nur $\Delta c_w = 0,006$.

Der Maßstab des Windkanalmodells ist das Ergebnis eines Kompromisses zwischen ausreichender Modellgröße, um eine hohe Reynolds-Zahl zu erreichen und die Fertigung von geometrischen Details zu ermöglichen und der Minimierung der Blockade im Windkanal. Für den Modellmaßstab von 1:4 konnte so eine Blockade von nur 4 % der Querschnittsfläche der Messstrecke erreicht werden.

Die äußere Hülle des Modells wurde mit einer Genauigkeit von 0,12 mm aus Ureol gefräst. Im Gegensatz hierzu wurden der Unterboden, die Abrisskanten am Heck und die Seitenspiegel mittels 3D-Druck hergestellt. Obwohl das Versuchsfahrzeug anhand von CAD-Daten detailliert nachgebildet wurde, mussten dennoch einige Vereinfachungen und Modifikationen – analog zum 1:4 Modell des IFS (siehe Kapitel 4.2.1) – vorgenommen werden, um die Stabilität des Modellfahrzeuges im Windkanal unter den Windlasten im Betrieb gewährleisten zu können. Zusätzlich wurden die Radkästen für die Montage von zusätzlichen, bürstenlosen Motoren verändert, mit denen die Rotation der Räder realisiert werden konnte. Sämtliche Räder wurden dynamisch ausgewuchtet und die Halterung des Modells wurde auf einem eigenen Fundament montiert. Dadurch konnte das Modell vom Windkanal und den Kanalvibrationen entkoppelt werden. Zusätzlich wurde ein kleiner Spalt von 1 mm Breite zwischen den Rädern und dem Laufband freigelassen, um instationäre Störungen auf Grund von Rad-Band-Interaktionen durch das Laufband während der dynamischen Kraftmessungen zu vermeiden.



Abbildung 4-22: Links: 1:4-Modell des Versuchsfahrzeugs der SWG mit Laufband und Modellhalterung am Dach. Rechts: Detaillierter Unterboden des Fahrzeugmodells.

Messtechnik im Fahrzeugmodell

Zwischen dem Modell und der Modellhalterung war eine 6-Komponenten Kraftwaage aus 4 piezoelektrischen Kraftsensoren (Kistler 9317B) montiert. Damit konnten die auf das Fahrzeug wirkenden Kräfte mit einer Abtastrate von 1000 Hz direkt ermittelt werden. Die Genauigkeit der Kraftwaage über den vollen Messbereich von 600 N betrug $\pm 0,1\%$. Zusammen mit der Messgenauigkeit für die Strömungsgeschwindigkeit ergibt sich ein Schwankungsbereich von $\Delta c_w = 0,002$ für den Widerstandsbeiwert.

An der Fahrzeugoberfläche wurden 128 Druckbohrungen an Positionen gesetzt, die den Positionen der Druckbohrungen am 1:1-Versuchsfahrzeug entsprechen (vgl. Abbildung 4-2). Zur Aufnahme der Drücke wurde das im Fahrversuch eingesetzte Messsystem bestehend aus 2 *ESP64HD* Druckaufnehmern und einem *DTC Initium* Datenerfassungssystem verwendet. Die Druckaufnehmer waren im Fahrzeug montiert und das *DTC Initium* war außerhalb der Messstrecke aufgestellt.

Die elektrische Anbindung an die Datenerfassungssysteme außerhalb des Kanals erfolgte im Fall der Druck- und Kraftsensoren und der Elektromotoren über Kabel innerhalb eines Schachts in der Modellhalterung. So wurde die Strömung nicht beeinflusst.

Da für die Datenerfassung 2 unterschiedliche Systeme (*Dewetron 501* und *DTC Initium*) verwendet wurden, wurden beide Systeme über ein Startsignal synchronisiert. Die typische Messzeit betrug bis zu 100 s bei Abtastraten von 250 Hz für die Druckmessungen. Für die Kraftmessungen wurden Abtastraten mit 1000 Hz verwendet.

Messtechnik zur Bestimmung der Anströmbedingungen

Um die räumliche Ausbreitung der Strömungsstrukturen bestimmen zu können, wurde ein Array aus 11 Fünflochsonden von *Vectroflow* (siehe Abbildung 4-23) gefertigt. Die Sonden waren 0,125 m über dem Boden angeordnet. In x-Richtung befanden sich die Spitzen der Sonden an Positionen, die 0,25 m vor der für die Vorderkante des Windkanalmodells vorgesehenen Position lagen. Dies entspricht im Modellmaßstab der Position des Arrays mit einem Abstand von 1 m vor dem Fahrzeug aus den Versuchen auf den Teststrecken. Die Abstände der Sonden zur Mittelachse in Querrichtung betragen $\Delta y = \pm[0; 0,05; 0,125; 0,2; 0,25; 0,35]$ m. Die Halterung war aerodynamisch optimiert, um die Ausbreitung von Störungen ausgehend von den Sondenhaltungen zu den Druckmessstellen an den Sondenspitzen stromauf zu minimieren. Das hierfür gefräste Aluminiumprofil verfügt über interne Schächte, in denen Druckschläuche verlegt wurden, die zu den Messsystemen außerhalb der Kanalströmung geführt wurden. Zur Bestimmung der Geschwindigkeitskomponenten und Anströmwinkel wurden die Druckwerte an den einzelnen Löchern der Sonden gemessen und unter Nutzung von Kalibrierkurven in die Geschwindigkeitskomponenten konvertiert. Auch hier wurde zur Bestimmung der Drücke analog zum Fahrversuch das *DTC Initium* mit *ESP64HD* Sensoren bei einer Abtastrate von 250 Hz verwendet. Als Referenzdruck wurde der Umgebungsdruck im Plenum verwendet. Wie bei den Fahrversuchen wurden

Schläuche mit einer Länge von 1,5 m verwendet. Damit konnte dieselbe Druckkorrekturgleichung wie bei den Fahrversuchen angewendet werden (siehe Kapitel 4.1.1 - Messtechnik). Um eventuelle Stellungsfehler der Sonden auszugleichen, wurden Messungen in der freien Anströmung durchgeführt. Die ermittelten Winkel und Geschwindigkeiten wurden dann als konstante Korrekturfaktoren in den Auswertungen der Messungen verwendet.

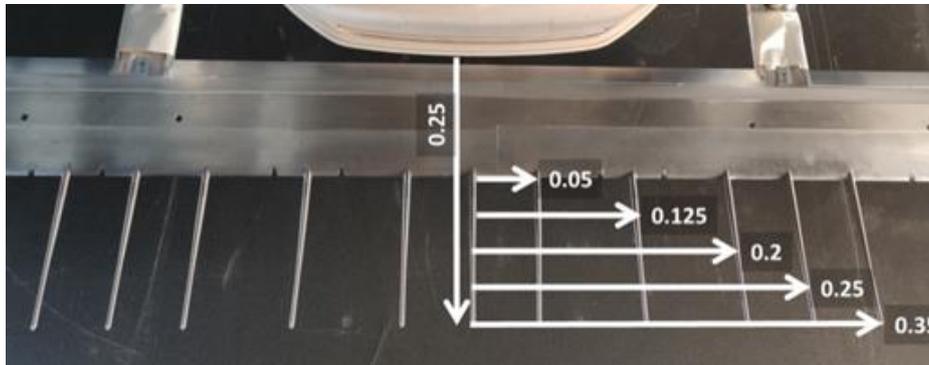


Abbildung 4-23: Positionierung der Fünflochsonden vor dem Modell und in der Breite bei $z = 0,125$ m.

4.2.4 Tunnelsimulationsanlage Göttingen des DLR

Die Experimente zum impulsartigen Seitenwind in verkleinertem Maßstab wurden in der Tunnelsimulationsanlage Göttingen (TSG) des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) durchgeführt. Um die im Projekt vorgesehenen Untersuchungen mit Fahrzeugmodellen durchführen zu können, musste die TSG Versuchsanlage – wie weiter unten beschrieben – weiterentwickelt werden. Ein speziell ausgelegter Boden wurde so in der Anlage montiert, dass das Fahrzeugmodell mit Reifenkontakt am Boden entlang rollt. Zusätzlich wurde zur Simulation des Seitenwindes ein seitlich angeordneter Windkanal betrieben (Abbildung 4-24). Dabei wird ein Modellfahrzeug durch ein hydraulisch-pneumatisch angetriebenes Katapult auf eine maximale Geschwindigkeit von bis zu 100 m/s beschleunigt. Zur Beschleunigung wird ein Hilfsschlitten unter dem Fahrzeugmodell verwendet, der über eine elektromagnetische Bremse verfügt, so dass das Modell frei über die Schienen der Teststrecke rollen kann. Anschließend wird das Modell in einem mit Styroporkugeln gefüllten Bremsstank abgebremst. Die Anlage ist insgesamt 60 m lang und Messungen können in einem Testabschnitt von 23 m Länge durchgeführt werden.

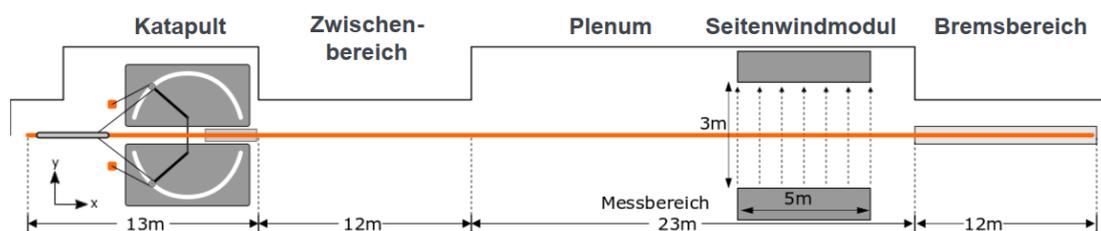


Abbildung 4-24: Skizze der Tunnelsimulationsanlage des DLR Göttingen mit den 5 verschiedenen Bereichen der 60 m langen Anlage.

Der Seitenwind wird von einem Windkanal Göttinger Bauart mit offener Messstrecke mit Hilfe von 4 30 kW starken, individuell steuerbaren Lüftern erzeugt und trifft im rechten Winkel mit einer maximalen Geschwindigkeit von $v_w = 25$ m/s und einer Turbulenzintensität von etwa ~ 2 % auf die Teststrecke. Der Seitenwindkanal ist 5 m breit (12,5 Fahrzeuglängen) und verfügt über einen 1 m hohen Strömungsstrahl, durch den die bewegliche Modellschiene verläuft (siehe Abbildung 4-24). Bei Modellgeschwindigkeiten von $v_F = 35 - 48$ m/s und Seitenwindgeschwindigkeiten von $v_w = 5-25$ m/s wurden relative Anstellwin-

kel (Fahrzeug zu resultierender Anströmung) im Bereich von $\beta = 0; 5; 10; 22$ und 30° erreicht. Die Reynolds-Zahl wurde über die Länge $l = 0,4$ m ermittelt. Damit ergeben sich Reynolds-Zahlen von $Re_b = 0,94 - 1,3 \cdot 10^6$.

Im Testabschnitt des Seitenwindmoduls befindet sich die oben erwähnte, 7,5 m lange, Bodenplatte (19 Fahrzeuglängen). Sie beginnt 1,25 m vor dem Seitenwindbereich und endet 1,25 m danach. Insgesamt hat die Platte eine Breite von 2,6 m (Abbildung 4-25). Die luvseitige Kante hat ein 3:1 ellipsenförmiges Profil, ist 18 mm dick und befindet sich 0,25 m über dem unteren Rand des Düsenauslasses des Windkanals. Vor der Bodenplatte befindet sich ein zusätzlicher Abschnitt, der 2 m lang (5 Fahrzeuglängen) und 1,2 m breit ist. Dieser Abschnitt hat einen relativ kleinen Anstiegswinkel und nähert sich so der Höhe der großen Bodenplatte an. Dieser zusätzliche Bereich dient dem Zweck, den Kontakt mit den Gummireifen - die beim Überfahren den Boden berühren und somit aus der Ruhe beschleunigt werden – und des sich bewegenden Automodells herzustellen.

Fahrzeugmodell

Das Modell eines VW Golf VII im Maßstab 1:10 wurde auf einem Modellträger aus Kohlefaser montiert, der sich auf Metallrädern über die Schienen bewegt. Drei zylinderförmige Modellhalter (8 mm) verbinden das Modell mit Aluminium- und Kohlefaserplatten, die am Modellträger befestigt sind (Abbildung 4-25). Das Modell befindet sich an einer Position, die ungefähr einem Drittel der Länge des 2 m langen Trägers entspricht, dessen Vorderseite stromlinienförmig ist. Die Bodenplatten haben in der Mitte einen 14 mm breiten Schlitz, durch den die 8-mm-Modellhalterungen hindurchgeführt werden (Abbildung 4-25).

Das Modell gleicht dem realen Fahrzeug bis auf geringfügige Vereinfachungen. Hierzu zählen der Verzicht auf kleinere Details an den Außenflächen (Fensterdichtungen, Scheibenwischer, Antenne etc.), und am Unterboden (z.B. kleine Streben, Röhren, Bohrungen, Klammern). Die Seitenspiegel sind entfernt worden, da sie für das Experiment mit dem beweglichen Modell aus mechanischer Sicht zu empfindlich sind. Die Radgeometrie des Modells ist von der des Originalfahrzeugs abgeleitet. Die Rotation der Reifen nach Kontakt mit der Rampe wurde mit einer Slow-Motion-Kamera (1000 Bildern pro Sekunde) überprüft. Dabei wurde eine Rotationsgeschwindigkeit ermittelt, die mit der Geschwindigkeit des Modellfahrzeugs über dem Boden übereinstimmte.

Messtechnik

Die Datenerfassung für das bewegliche Modell erfolgt mit Hilfe eines im Modell mitgeführten *Teensy* 3.6 Mikrocontrollers mit einem 180-MHz *ARM-Cortex-M4*-Prozessor. Dieses System verfügt über 25 analoge Kanäle mit einer 14-Bit-Auflösung, 58 mögliche digitale Ein- und Ausgänge sowie über einen integrierten Mikro-SD-Karten-Leser. Die Abtastrate beträgt 3300 Hz bei einer Messdauer von 1,5 s. Das Signal-Rausch-Verhältnis (Spitzendruck bei der Messung am bewegten Modell geteilt durch die Standardabweichung des Drucks bei der Messung am stationären Modell) des Systems liegt bei ~ 300 (50 dB).

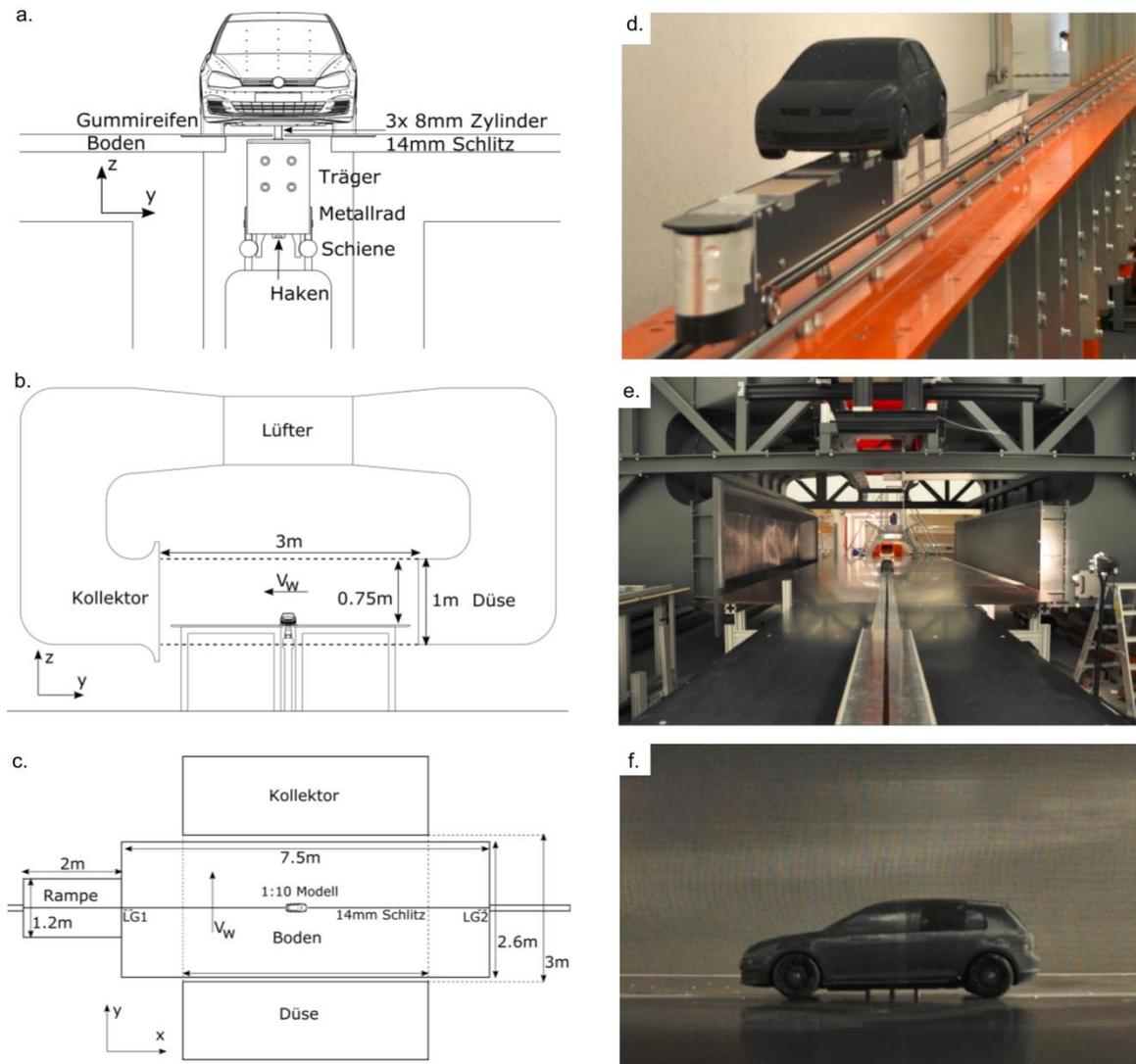


Abbildung 4-25: Automobilkonfiguration der TSG: a, d) maßstabsgetreues Fahrzeugmodell, das auf dem Modellträger montiert ist; b, e) Seitenwindmodul; c, f) Bodenplatte im Seitenwindtestabschnitt.

Die Oberflächendruckmessungen wurden mit Hilfe von 24 Druckbohrungen durchgeführt, die über 150 mm lange Silikonschläuche mit einem Innendurchmesser von 0,6 mm mit *Freescala* ± 7 kPa Differenzdruckwandlern verbunden waren. Der potentielle Fehler der Druckmessung wurde auf etwa ± 20 Pa geschätzt ($\Delta c_p = \pm 0,05$). Der Referenzdruck war auf ein gemeinsames internes Reservoir bezogen, das vor jedem Abschuss des Modells geöffnet wurde und somit nominell den atmosphärischen Druck enthielt. Für die Phasen- und Amplitudenkorrekturen der Frequenzantwort der Schläuche wurde eine theoretisch berechnete Transferfunktion [41] unter Anwendung der inversen Transferfunktion [60] verwendet. Die Druckbohrungen befanden sich an den vorderen und hinteren Stoßstangen sowie auf der Mittellinie des Fahrzeugs.

Die Position des sich bewegenden Modells in Relation zum Seitenwindmodul wurde mit Hilfe eines im Modell eingebauten Fototransistors bestimmt. Dieser erkannte, wenn das Modell 2 Paar LED-Streifen, die sich an bekannten Positionen entlang der Strecke befanden, passierte (Abbildung 4-25c - LG1, LG2). Außerdem waren 5 Lichtschranken entlang der Fahrstrecke montiert. Mit den Lichtschranken konnte der Zeitpunkt bestimmt werden, wann sich das Modell an den Positionen der Lichtschranken befand. Die Lichtschrankenmessungen ermöglichten die Berechnung der Modellgeschwindigkeit und dienten

der Validierung des mit dem Modell mitgeführten Messsystems. Der atmosphärische Druck sowie die Temperatur des Plenums wurden ebenfalls außerhalb des Modells gemessen. Ein ± 16 g ADXL326-Beschleunigungsmesser wurde mit dem Modell mitgeführt, um eventuell auftretende Systemschwingungen zu erfassen.

4.3 Numerische Simulation

Im Projekt wurden numerische Strömungssimulationen mit zwei Verfahren durchgeführt, die auf grundsätzlich unterschiedlichen Ansätzen basieren und in der Fahrzeugaerodynamik häufig eingesetzt werden. Dabei handelt es sich um das kommerzielle Lattice-Boltzmann-Verfahren Simulia PowerFLOW® der Firma Dassault Systèmes und das quelloffene Finite-Volumen-Verfahren OpenFOAM, welches frei erhältlich ist.

4.3.1 Simulia PowerFLOW®

Die Lattice-Boltzmann-Simulationen werden in dieser Studie neben OpenFOAM mit der kommerziellen Simulationssoftware Simulia PowerFLOW® von Dassault Systèmes durchgeführt. Diese Software löst dabei die transiente, turbulente Fahrzeugumströmung mit der Lattice-Boltzmann-Methode (LBM) und modelliert die Turbulenzen mit dem Ansatz der Very-Large Eddy Simulation (VLES) [61–64]. Die Eignung der Simulationssoftware für aerodynamische Untersuchungen von Kraftfahrzeugen ist mit veröffentlichten Untersuchungen bestätigt worden. In der Literatur [65–71] existieren viele Studien zur Validierung der numerischen PowerFLOW® Simulation mit experimentellen Untersuchungen und bestätigt die Tauglichkeit der Simulationssoftware.

Im Folgenden werden die Rahmenbedingungen der numerischen Strömungssimulationen vorgestellt. Die numerischen Strömungssimulationen wurden im Maßstab 1:1 mit einer Anströmgeschwindigkeit von 27,8 m/s, den Fahrversuchen entsprechend, durchgeführt.

Das Versuchsfahrzeug wurde als detailliertes Simulationsmodell aus ca. 73 Mio. Voxeln mit der kleinsten Zellgröße von 1,5 mm Kantenlänge umgesetzt. Die Rotation der Räder wurde, entsprechend dem Stand der Technik, mit der Kombination aus der Sliding-Mesh-Methode für die Felge und der Rotating-Wall-Methode für die Reifen realisiert. Die Geometrie der Räder entspricht denen des Fahrzeugmodells im Maßstab 1:4. Zur Steigerung der Simulationsperformance und Vergleichbarkeit mit dem Fahrzeugmodell im Experiment, wurde das virtuelle Fahrzeug ohne Durchströmung des Motorraums simuliert. Die Randbedingungen und Netzverfeinerungen sind in Anlehnung an den Simulia PowerFLOW® Best Practices Guide [72, 73] definiert worden.

In Abbildung 4-26 ist die Simulationsbox (links) und die Netzverfeinerungen VR1 bis VR5 im Simulationenvolumen (rechts) abgebildet. Der Einlass (rot) gibt die Strömungsgeschwindigkeiten in x-, y- und z-Richtung in das Simulationenvolumen vor. Damit die Strömung der Simulationsrandbedingungen zwischen Einlass und dem Fahrzeug möglichst unverändert bleiben, wurden die Netzverfeinerungen VR1 bis VR5 von vor dem Fahrzeug bis zum Einlass verlängert [28, 29, 73].

Der Auslass (dunkelblau) ist mit einer Druckrandbedingung definiert. Die Decke (hellblau) und der Boden sind als reibungsfreie Wand dargestellt und das Fahrzeug steht auf einem mit Rauheit und Reibung behafteten Laufband (orange) welches sich mit Anströmgeschwindigkeit in Fahrtrichtung bewegt. Die Seiten des Simulationsvolums sind nicht begrenzt. Dadurch wird bei Schräganströmung ($\beta \neq 0$) die auf der einen Seite austretende Strömung auf der gegenüberliegenden Seite in das Simulationsvolumen eingeleitet und umgekehrt.

Mit dieser Vorgehensweise können Strömungsfelder analog zu den Randbedingungen im Windkanal bei der Verwendung des FKFS *swing*[®]-Systems sehr gut nachgebildet werden.

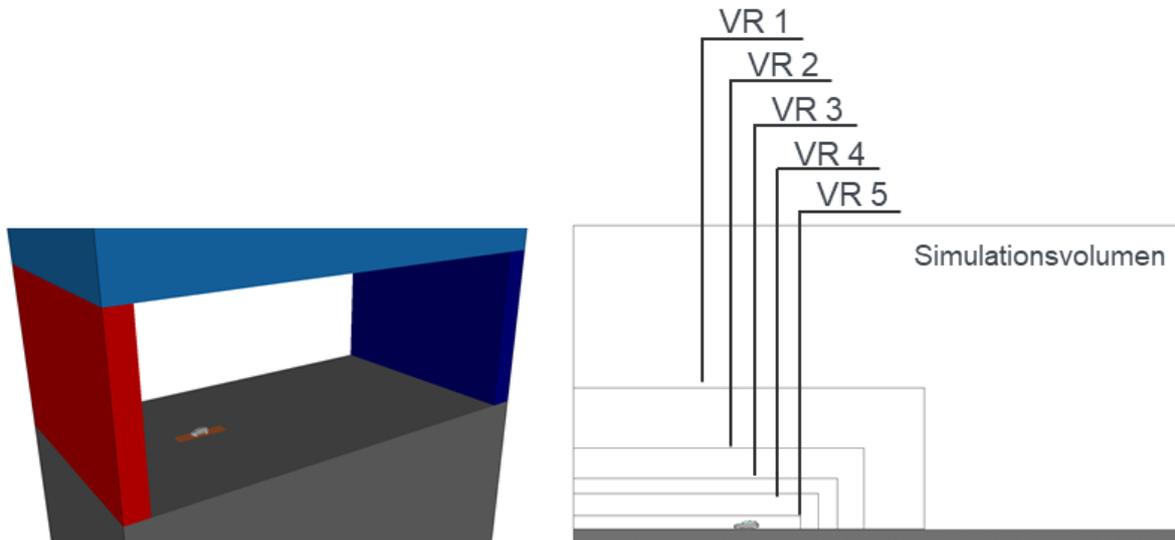


Abbildung 4-26: Simulationsbox mit Einlass (rot), Auslass (dunkelblau), Decke (hellblau), Boden reibungsfrei (dunkelgrau), Laufband mit $v = v_F$ (orange) und Fahrzeug (hellgrau) für Simulia PowerFLOW[®] (links); Netzverfeinerungen (VR-Regionen) eins bis fünf im Simulationsvolumen (rechts).

Die Netzverfeinerungen um die Fahrzeuggeometrie VR6 bis VR10 sind ebenfalls in Anlehnung an den Simulia PowerFLOW[®] Best Practices Guide [72] erstellt und in Abbildung 4-27 visualisiert. Um der Schräganströmung in y-Richtung Rechnung zu tragen, sind die Netzverfeinerungen VR 6 und VR7 in der xy-Ebene mit einer Aufweitung von 10° versehen. Dieser Winkel entspricht dem Bereich der zu erwartenden Schräganströmung der Fahrversuche.

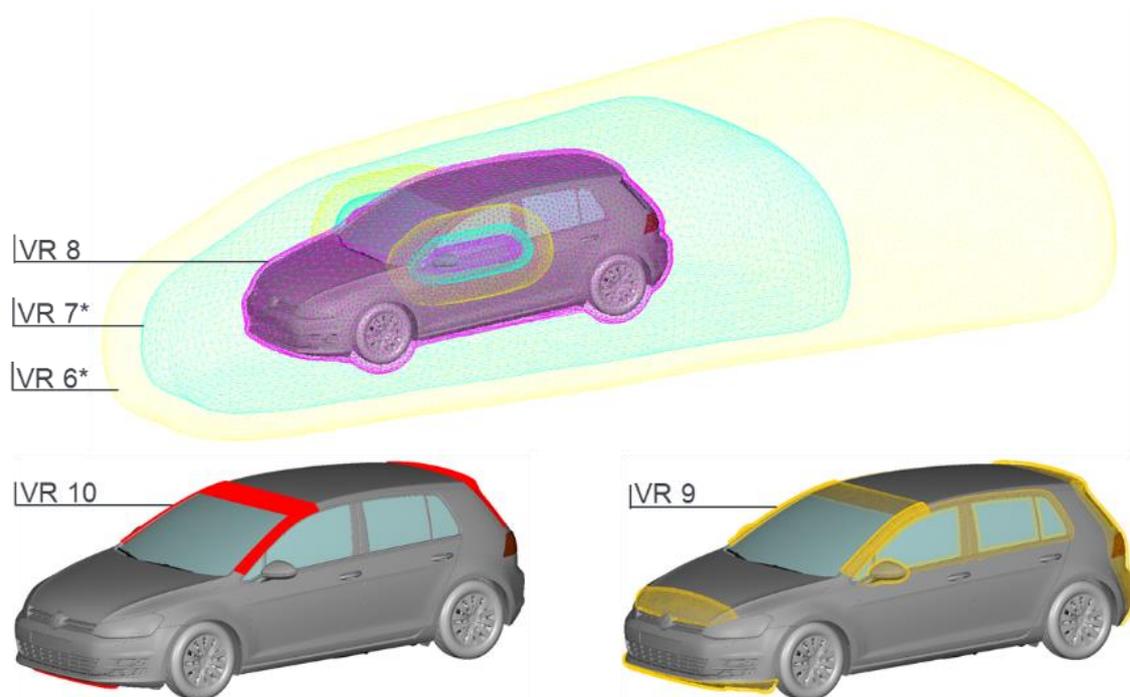


Abbildung 4-27: Netzverfeinerungen VR 6 bis 10 nach Simulia PowerFLOW[®] Best Practices Guide [72] um das Fahrzeug in Simulia PowerFLOW[®] mit einer *Aufweitung VR 6 & 7 von 10° in der xy-Ebene.

Netzverfeinerungen in der Region des Kühlergrills oder anderer durch Kühlluft beeinflussten Bereiche sind aufgrund der fehlenden Motorraumdurchströmung nicht notwendig. Die geometrische Umsetzung des geschlossenen Vorderwagens des VW Golf VII sind in Abbildung 4-14 (links) und die in der Simulation verwendeten Räder (rechts) dargestellt. Die Vorgehensweise der Ableitung der Radgeometrie von den Rädern des Versuchsfahrzeugs ist in Abschnitt 4.2.1 beschreiben.

Die Luftkraftbeiwerte des VW Golf VII sollen unter stationären und instationären Anströmungen mit dem Experiment verglichen werden. Zusätzlich bietet die numerische Simulation größere Freiheiten bei der Realisierung der instationären Anströmung.

Neben der stationären Anströmung sollen sowohl die Anströmwinkel als auch die Anströmgeschwindigkeit variiert werden. Die Randbedingungen dieser Simulationen werden zum einen als *gleichförmige instationäre Anströmung* und zum anderen als *verteilt instationären Anströmung* umgesetzt. Bei der *gleichförmigen instationären Anströmung* variieren die Strömungsgeschwindigkeiten am Einlass der Simulationsbox an jeder Position der yz-Ebene gleichermaßen. In Abbildung 4-28 ist die *gleichförmige instationäre Anströmung* als Prinzipskizze dargestellt. Für diesen Ansatz gibt es wiederum zwei verschiedene Varianten. Einerseits wird lediglich die Strömungsgeschwindigkeit in der y-Richtung variiert. Dies bedeutet, dass die zeitabhängige Strömung unter variierenden Anströmwinkeln auf das Fahrzeug trifft und entspricht damit dem Ansatz im Windkanal mit FKFS *swing*[®].

Andererseits wird bei der zweiten Variante neben der y-Richtung ebenfalls die x-Richtung der Strömungskomponenten des Simulationseinlass instationär abgebildet. Als Resultat dieser Randbedingungen erfährt das Fahrzeug neben variierender Schräganströmung auch eine instationäre Anströmgeschwindigkeit.

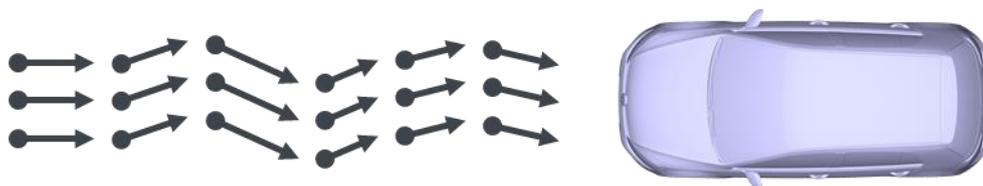


Abbildung 4-28: Prinzipskizze der gleichförmigen instationären Anströmung.

Neben der *gleichförmig instationären Anströmung* wird eine *verteilt instationäre Anströmung*, die Zeit und Ort abhängig ist, umgesetzt. Die Erstellung dieser Simulationen wurde in enger Zusammenarbeit mit Dassault Systèmes durchgeführt.

In Abbildung 4-29 ist die stationäre Anströmung (links) und die Methode der *verteilt instationären Anströmung* für zwei Szenarien (Mitte & rechts) beispielhaft dargestellt. Die Randbedingungen des ersten Szenarios, die freie Fahrt ohne andere Verkehrsteilnehmer unter Einfluss von natürlichem Wind, ist vergleichbar mit der Konstantfahrt (*KF*) auf der Teststrecke (siehe Abschnitt 4.1.3). Im Vergleich zur stationären Anströmung ist zu erkennen wie die Strömungsgeschwindigkeit im Bereich um das Fahrzeug variiert und durch Windeinflüsse der Nachlauf des Fahrzeugs beeinflusst wird.

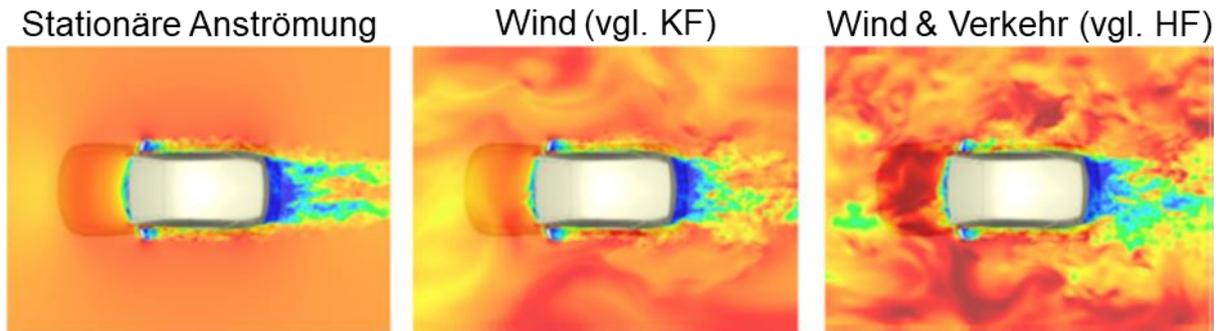


Abbildung 4-29: Strömungsgeschwindigkeit der verteilt instationären Anströmung für verschiedene Anströmbedingungen; stationäre Anströmung - Windkanal (links), Wind - Konstantfahrt auf der Teststrecke (Mitte) und Wind & Verkehr - Hinterherfahrt auf der Teststrecke nach [72].

Das zweite Szenario zeigt die An- und Umströmung des Fahrzeugs unter Wind- und Verkehrseinflüssen. Die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten um das Fahrzeug weicht stark von den anderen beiden Strömungssituationen ab. Diese Randbedingungen sind vergleichbar mit der Hinterherfahrt (*HF*) auf der Teststrecke (siehe Abschnitt 4.1.3) oder der Straßenfahrt (*SF*) im öffentlichen Straßenverkehr (siehe Abschnitt 0).

4.3.2 OpenFOAM

Die zuvor beschriebenen experimentellen Untersuchungen konzentrieren sich darauf, wie sich die Kraftbeiwerte eines Fahrzeugs während eines Fahrmanövers im Straßenverkehr verändern. Parallel dazu wurden, neben den CFD Simulationen mit Simulia PowerFLOW®, verschiedene Studien mit OpenFOAM (OpenFOAM-Studien) durchgeführt, um unterschiedliche CFD-Ansätze im Hinblick auf die Simulation kontrollierter Anströmbedingungen sowie die Vorhersage der Widerstandskraft in diesen Anströmbedingungen zu bewerten. Die CFD-Ergebnisse wurden anhand der gemessenen Daten validiert. Die dabei gewonnenen numerischen Strömungssimulationen konzentrieren sich auf den Fall der Hinterherfahrt, die auch als Fahrzeugverbundkonfiguration betrachtet werden kann. Dazu gibt es bereits zahlreiche Veröffentlichungen, z.B. von Schito [34].

Für die Variante zur Erzeugung der Anströmung CFD-Ansatz wurde eine neuartige Vorgehensweise entwickelt, bei dem die Ergebnisse der Fahrversuche – Hinterherfahrt (*HF*) und Konstantfahrt (*KF*) – verwendet werden, um eine Anströmungsrandbedingung zu simulieren. Bei der *HF*-Messung folgt ein Fahrzeug in konstantem Abstand einem Transporter mit Kofferaufbau. Beide Fahrzeuge fahren jeweils mit einer konstanten Geschwindigkeit (27,8 m/s). Bei den *KF*-Messungen war die Geschwindigkeit des Fahrzeugs ebenfalls konstant bei 27,8 m/s. Dieses Verfahren lässt sich leicht an andere Anströmbedingungen anpassen. Die mit dieser Randbedingung erzielten Ergebnisse werden in Abschnitt 6.2.1.3 diskutiert. Es wurden außerdem Berechnungen basierend auf einer Anströmung mit einem Blockprofil (*BP*) für ein sich bewegendes Fahrzeug durchgeführt, um Vergleichsdaten für die *HF*-Randbedingung zu generieren. In diesem Fall wurde als Anströmprofil ein gleichförmiges Geschwindigkeitsprofil verwendet, das durch $u = v_F$, $v = 0$ m/s und $w = 0$ m/s am Einlass gegeben ist, wobei v_F der durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit des Testfahrzeugs während einer Testfahrt entspricht.

Die zweite Variante, die im Rahmen dieses Projekts untersucht wurde, ist die eines Windkanaltests in dem die – im Fahrversuch am Array gemessenen – Geschwindigkeitsfelder simuliert wurden, um die wichtigsten physikalischen Parameter eines Straßenmanövers nachzubilden. Bei diesem Ansatz werden die Randbedingungen für das DLR-Klappensystem in der SWG verwendet, um die (auf der Teststrecke gemessenen) Anströmbedingungen im Windkanal zu simulieren. Jedes Element des Klappensystems

besteht aus einem statischen Flügelprofil mit einem beweglichen Flap. Durch die Steuerung der Bewegungsparameter für die Flaps (sinusförmig mit einer definierten Schwingungsamplitude und Schwingungsfrequenz) können die Längen- und Zeitskalen der Anströmung simuliert werden. Es wurden die Klappenbewegungsparameter gewählt, die die Straßenbedingungen am besten mit einer sinusförmigen Bewegung widerspiegeln (Schwingung mit einer Amplitude von 10° bei einer Frequenz von 10 Hz). Der Verlauf der Klappenbewegung ließe sich jedoch beliebig anpassen. Die Methode und ihre Anwendbarkeit werden im folgenden Abschnitt beschrieben. Es wird auch ein Überblick über die möglichen Herausforderungen sowohl bei der numerischen als auch bei der physikalischen Modellierung gegeben. Schließlich werden die Ergebnisse in Abschnitt 6.2.1.3 diskutiert.

Vorbereitende Arbeiten

Die numerischen Arbeiten wurden mit Hilfe der von Engys veröffentlichten kommerziellen Version von OpenFOAM durchgeführt. Die Software ANSA wurde für folgende vorbereitende CAD-Modifikationen verwendet:

- Die Fahrzeugfront wurde – analog zu den Simulationen in Simulia PowerFLOW® – geschlossen, um die Simulation zu vereinfachen und um einen besseren Vergleich mit den Windkanalversuchen, bei denen eine geschlossene Fahrzeugfront verwendet wurde, zu erzielen.
- Der Neigungswinkel des 3D-Modells wurde an die experimentellen Werte angepasst.

Allgemeine Informationen zu den OpenFOAM-Arbeiten

Dieser Abschnitt enthält einen kurzen Überblick der verwendeten numerischen Werkzeuge. Zunächst wird die Lösung des diskreten numerischen Gleichungssystems diskutiert, gefolgt von einer kurzen Erörterung allgemeiner Aspekte in Bezug auf die Netzgenerierung. Im Anschluss werden die Testfälle Hinterherfahrt (HF) und Windkanaltest (WT) genauer beschrieben. Es ist zu beachten, dass in der vorliegenden Studie beim Vergleich der Integralkräfte mit dem Experiment die Kraftpunkte definiert als

$$\Delta c_w = 1000 \cdot |c_w^M - c_w^C| \quad \text{Gleichung (16)}$$

für den Widerstand zugrunde gelegt werden. Ein Widerstandspunkt entspricht dann einem Unterschied von 0,001 Widerstandseinheiten. Ähnlich gilt für den Auftrieb folgende Formel:

$$\Delta c_A = 100 \cdot |c_A^M - c_A^C| \quad \text{Gleichung (17)}$$

M ist dabei ein gemessener oder ein experimenteller Referenzwert. C bezeichnet das berechnete Äquivalent. Die Referenzwerte für M stammen aus den Fahrversuchen mit dem Fahrzeug in Originalgröße oder aus den verkleinerten Versuchen mit dem Modell im Windkanal. Der bewegte Boden und die Radrotation werden im Windkanal genutzt, um reale Fahrbedingungen zu simulieren. Die Referenzwerte für den Windkanalfall stammen aus DLR-Messungen in der SWG und werden in Kapitel 6.3 genauer beschrieben. Die Referenzwerte für die 1:1-CFD-Simulationen stammen aus Messungen mit dem Versuchsfahrzeug am IFS FWK bei 27,8 m/s.

Lösung der maßgebenden Gleichungen

Die Lösung der stationären, inkompressiblen Navier-Stokes-Gleichungen erfolgte mit dem Lösungsalgorithmus SIMPLE in OpenFOAM gelöst. Die stationären Lösungen wurden Erzeugung hinreichend gut aufgelöster Rechengitter verwendet. Im Gegensatz dazu wurden die instationären Lösungen dann mit Hilfe der PISO- und PIMPLE-Algorithmen ermittelt. Es wurden die Standardbedingungen für Ein- und Ausströmung sowie die Randbedingung einer bewegten Wand am Boden verwendet, mit Ausnahme eines speziellen Einlassrands, der in den folgenden Abschnitten noch eingehend diskutiert wird.

Bei den verwendeten Wandfunktionen handelt es sich um die Standardwandfunktionen für hohe Reynolds-Zahlen. Die Gleichungen wurden unter Verwendung eines zentralen Standardschemas zweiter Ordnung für die viskosen Terme diskretisiert, während die konvektiven Terme unter Verwendung von Varianten hybrider Zentral-/Upwind-Differenzschemata zweiter Ordnung diskretisiert wurden. Zeitableitungen für instationäre Berechnungen wurden mit Hilfe eines Crank-Nicolson-Schemas zweiter Ordnung approximiert. Während des ersten Teils einer instationären Simulation wurde jedoch ein Euler-Schema erster Ordnung verwendet, um die Wirkung von Anfangstransienten zu reduzieren. Für stationäre und instationäre Berechnungen mit konstanten Einströmbedingungen wurde ein Löser für die Potentialströmung genutzt, um konsistente Ausgangsbedingungen zu erzeugen.

Nicht konstante Einströmrandbedingungen erfordern Sorgfalt bei der Lösung der Druckkorrekturgleichung, was eine Kombination aus Unterrelaxation, Lockerung der Konvergenzkriterien und Erhöhung der Anzahl der Iterationen der Innen-/Außendruckkorrektur notwendig macht. Die stationären Berechnungen wurden beendet, sobald der globale Kontinuitätsfehler weniger als 10^{-13} betrug und die relativen Fehler für jede Gleichung in der gleichen Größenordnung lagen.

Ähnliche Einschränkungen des globalen Kontinuitätsfehlers waren für die instationären Berechnungen erforderlich. Die relativen Fehler in Bezug auf die Gleichungen wurden auf 10^{-8} erhöht, da die Verbesserungen der Lösungsgenauigkeit für geringere relative Restfehler eher klein waren und zusätzliche Rechenaufwand nach sich zogen, die nicht im Verhältnis zum Nutzen stünden.

Zeitabhängige Einströmrandbedingungen erzeugten zunächst numerische Instabilitäten stromabwärts der HF-Einströmungsgrenze. Diese wurden entweder durch Reduzierung der Courant-Zahl oder durch Hinzufügen zusätzlicher Druckkorrekturschritte behoben.

Netzgenerierung

Der Koordinatenursprung für alle verwendeten Netze befindet sich auf Bodenhöhe in der Symmetrieebene der Vorderachse. Netzgenerierung und Netzverfeinerung basieren auf kartesischen Vernetzungsprinzipien, die sowohl für den WT- als auch für den HF-Fall angewendet wurden. Ein überlagerndes isotropes kartesisches Netz mit einer Kantenlängenskala von L_0 wurde erstellt. Eine erste Darstellung der Grenzzellen mit dem Fahrzeug wurde mit Hilfe der Schnittmenge der Modell-CAD-Flächen mit diesem Netz erzeugt. Diese Grenzzellen (sowie Zellen in anderen ausgewählten Regionen) wurden anschließend durch Unterteilung der Kanten des Kontrollvolumens verfeinert, bis ein bestimmtes Kriterium der Kantenlängenskala erfüllt war. In dieser Arbeit wird die verfeinerte Kantenlänge L_N auf der N -ten virtuellen Verfeinerungsebene (VRN) angegeben mit $L_N = L_0/2^N$. Die in dieser Arbeit verwendeten Netze wurden mit Hilfe von zwei Verfeinerungsmethoden erzeugt. Die wandnormale Verfeinerungsmethode ist in Abbildung 4-30 dargestellt. Alle Modelloberflächen wurden auf dieselbe Oberflächenflächen-Kantenlängenskala, L_S , diskretisiert.

Die Empfehlungen von [74] wurden angewendet, um Oberflächennetzlängen in der Größenordnung von $L_S/L_R \leq 8,83 \cdot 10^{-4}$ einzustellen (L_R ist hier die Reynolds-Länge, die in dieser Studie der Fahrzeuglänge entspricht). Diese Beziehung stellt eine funktionelle Beziehung zwischen L_S und L_R her. Für diese Studie hat L_S eine Länge von 0,002 m.

Die erste Verfeinerungsschicht Δ_1 enthält 4 Zellen mit einer Kantenlänge L_S und mit einem maximalen Seitenverhältnis von etwa 1 in Richtung der Wandnormalen (VR8). Die zweite Verfeinerungsschicht Δ_2 (VR7) enthält 10 Zellen mit einer Kantenlänge von $2 \cdot L_S$ und einem maximalen Seitenverhältnis von 2 in Richtung der Wandnormalen. Δ_3 (VR6) umfasst 20 Zellen mit einer Kantenlänge von $4 \cdot L_S$ und einem maximalen Seitenverhältnis von 4. Diese Schicht geht in die in den folgenden Abschnitten beschriebenen zonenbezogenen Verfeinerungsbereiche über.

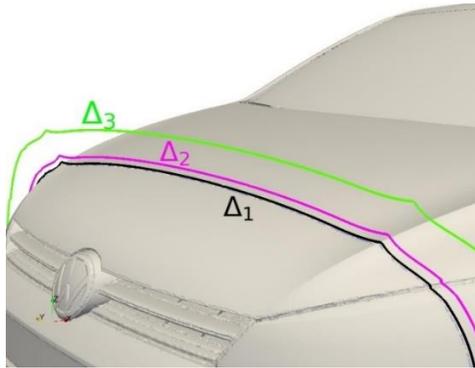


Abbildung 4-30: Die Verfeinerung in Wandnormalenrichtung ist in dieser Abbildung dargestellt. Die obere Grenze des Bereichs Δ_3 geht in einen volumetrischen Verfeinerungsbereich über. Stimmen diese beiden Verfeinerungsebenen nicht überein, werden die Verfeinerungsebenen von Δ_3 nach außen verlaufend allmählich zusammengeführt.

Eine Übersicht über die erzeugten Netze ist in Tabelle 4-4 zu finden. Simulationen der realen Straßenbedingungen sind rechnerisch anspruchsvoll. Die Windkanalberechnungen erfordern trotz ihrer zusätzlichen Komplexität weniger Netzressourcen.

Tabelle 4-4: Zusammenfassung der Gittereigenschaften, N_v : Anzahl der Kontrollvolumen, N_{wn} : Anzahl der wandnormalen Hexaeder, y_+ : dimensionsloser Wandabstand.

	Nomenklatur	Maßstab	u_∞ / m/s	Re / Mio.	N_v / Mio.	N_{wn}	y_+
Teststrecke	HF	1:1	27,8	3	160	3	10-30
Windkanal (SWG)	WK	1:4	27,8	0,6	16	8	10-30

Simulation Hinterherfahrt

Für den HF-Fall wurde ein zonenbezogener Verfeinerungsansatz, wie Abbildung 4-31 dargestellt, angewendet.

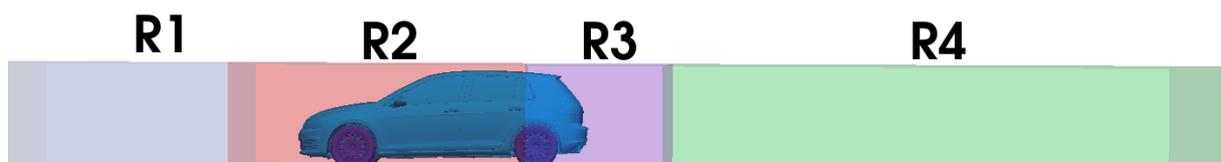


Abbildung 4-31: Darstellung der zonenbezogenen Verfeinerungsbereiche auf der Symmetrieachse ($y = 0$ m) und in der x - z -Ebene. R1 (Anströmung, VR4), R2 (Front und mittlerer Bereich, VR5), R3 (direkter Nachlauf, VR4), R4 (entfernter Nachlauf, VR3).

Ein Anströmbereich (R1), der sich über einen Bereich von 0,5 bis 2 Fahrzeuglängen vor der Fahrzeugnase erstreckt, wurde definiert. Das Netz in diesem Bereich sollte fein genug sein, um als Übergang zwischen dem größeren äußeren Netz und dem Netz, das um das Fahrzeug gelegt ist, zu fungieren. Die Netzauflösung in dem Bereich, in dem sich das Netz direkt um das Fahrzeug (R2) befindet, muss fein genug sein, um den zuverlässig Staudruck an der Fahrzeugnase zu simulieren und die richtige Entwicklung der Strömung an den Fahrzeugseiten und am Unterboden zu ermöglichen. Die Verfeinerungsbereiche für den direkten Nachlauf (R3) und den entfernten Nachlauf (R4) wurden ebenfalls spezifiziert, wobei R1 und R2 die kritischsten Bereiche für eine gute Vorhersage des Widerstands sind. Die zonenbezogenen Verfeinerungsbereiche erstrecken sich von der Symmetrieachse ($y = 0$ m) bis zu $1,3 \cdot b$, wobei b der durchschnittlichen Länge des Fahrzeugs entspricht.

Das Rechengebiet für den HF-Fall umfasst maximale Längen von 100 m in Strömungsrichtung (x), 87 m in Spannweitenrichtung (y) und 51 m in vertikaler Richtung (z). Die y+-Werte lagen erzwungenermaßen im Bereich von 5 - 60. VR-Verfeinerungen mit $N > 8$ führten zu Netzen, die keine ausreichende Verbesserung der berechneten Integralkräfte lieferten, um die zusätzlichen Aufwand zu rechtfertigen. Die Bodenoberfläche wurde auf das gleiche Niveau diskretisiert wie alle überlappenden VR-Bereiche, mindestens jedoch auf VR3. Die Oberflächenelemente der Reifen, die sich unter dem simulierten Boden befanden, wurden entfernt.

4.3.2.1 Validierung der CFD-Simulation und des Netzes

Mehrere vorbereitende Berechnungen wurden durchgeführt, um die geeigneten numerischen Differenzenschemata und Vernetzungsverfahren auswählen zu können. Dazu gehören auch eine Reihe einfacher Strömungen, die in diesem Bericht nicht näher vorgestellt werden. Die Ergebnisse der Validierungsrechnungen sind in Tabelle 4-5 zusammengestellt. Der sich bewegende Boden und die Reifenrotationseffekte wurden durch Anwendung der entsprechenden Quellterme über Randbedingungen simuliert.

Tabelle 4-5: Vergleich des berechneten Widerstands mit dem Ergebnis aus dem Referenzwindkanal. Anmerkung: C^* = Gesamtberechnungszeit normalisiert auf die Gesamtzeit für die stationäre Berechnung mittels MSST, n = Exponent des Berechnungsschrittes, der zur Aufrechterhaltung von CFL $\sim O(1)$ ($dt \sim 1^{-n}$) für alle Netzkontrollvolumen benötigt wird.

C1	Tu _x / %	Turbulenzmodell	C _A	$ \Delta C_A $	C _w	$ \Delta C_w $	C*	n
RANS (stationär) + Blockprofil BP am Einlass								
2000	6	MSST	0,15	9	0,31	27	1	-
DDES (instationär) ($\Delta t < 1,0^{-6}$ s) + Blockprofil BP am Einlass								
12	6	MSST-DDES	0,058	2	0,285	2	150	5
13,5	6	SA-DDES	0,14	8	0,286	3	150	5

In einem ersten Schritt wurde mit dem Turbulenzmodell Menter-SST [75] eine stationäre Lösung berechnet. Diese RANS-Simulation lieferten ein – im Vergleich zu den Messungen – deutlich höheren Fahrzeugwiderstand. Im Vergleich dazu reduzieren die instationären, skalenauflösenden Simulationen, die sowohl mit SA-DDES [76] als auch mit MSST-DDES [77] (beides hybride LES-RANS-Methoden) durchgeführt wurden, die Unterschiede zwischen dem Windkanalexperiment mit dem Fahrzeug in Originalgröße und der CFD-Simulation für alle Fälle auf unter 10 Widerstandspunkte. Diese Beobachtungen werden auch in der Literatur beschrieben [1]. Der Nachteil einer instationären hybriden Methode ist, dass der rechnerische Aufwand enorm steigt. Tabelle 4-5 zeigt, dass der Unterschied zwischen einer Berechnung mit einer RANS- und einer Hybrid-Methode im Hinblick auf den Rechenaufwand nicht unerheblich ist. Nach Abschluss dieser Validierungstests wurde die Hinterherfahrt simuliert.

Generierung gemischter Einströmungsrandbedingungen

Mit Hilfe der mit 250 Hz am Fahrzeugarray ermittelten Geschwindigkeitskomponenten aus den Fahrversuchen auf der Teststrecke – für Hinterherfahrt (HF) und Konstantfahrt (KF) – wurden unterschiedliche Einströmbereiche für einen Kern und ein Außengebiet festgelegt. Es ist wichtig, die Motivation für die Festlegung der unterschiedlichen Bereiche zu verstehen. (Der linke Teil von Abbildung 4-32 zeigt die unterschiedlichen Bereiche.) Für den Randbereich des Außengebiets wurden die experimentellen Daten aus den Konstantfahrten verwendet. Dagegen wurden für die Bestimmung des Einlassgebiets des Kerns die Messdaten aus der Hinterherfahrt bei 50 m Fahrzeugabstand herangezogen (HF-Kern). Das Fahrzeug befindet sich im Kerngebiet.

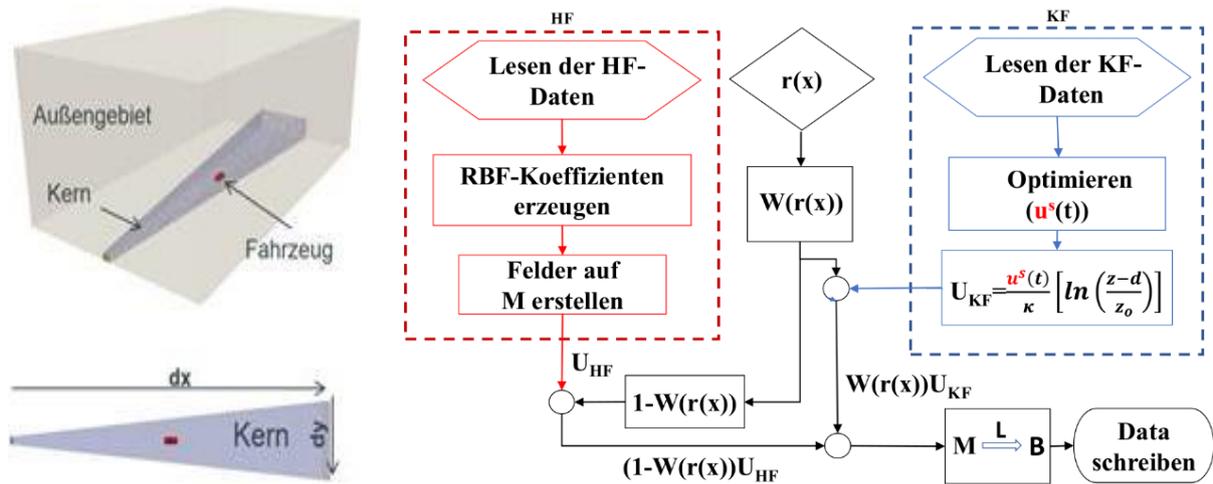


Abbildung 4-32: Links: Der Kern entspricht dem HF-Bereich, der innerhalb des Außengebiets der atmosphärischen Grenzschicht liegt. Das Wachstum des inneren Kerns wird durch Anpassung von dy/dx an gemessene Wachstumsraten einer Mischschicht bestimmt. Rechts: Ablaufdiagramm, das die Festlegung der Einströmgrenze zeigt. Der Aufbau der Geschwindigkeitsfelder für HF und KF erfolgt unabhängig, basierend auf den Messungen der Fahrversuche. Die Geschwindigkeitsfelder werden dann im Grenzgebiet über eine Gewichtungsfunktion W zusammengeführt.

Der Nachlauf eines vorausfahrenden Fahrzeugs und der atmosphärischen Grenzschicht (ABL) wird dabei als Zwei-Fluid-Problem behandelt, wobei beide Fluide eine gemeinsame Schnittstelle haben. Die Fluide werden durch unterschiedliche Zeit- und Längenskalenverteilungen charakterisiert und die Grenzfläche, die beide Fluide trennt, wird als Mischungsschicht betrachtet. Dadurch wird der HF-Bereich durch die Eigenschaften des Nachlaufs des vorausfahrenden Fahrzeugs beschrieben, während der Bereich der Konstantfahrt die atmosphärische Grenzschicht repräsentiert. Zur Definition von dy/dx in der Abbildung werden bereits veröffentlichte Werte für die Mischungsschichtausbreitungsrate [78] verwendet, sodass der Kern immer den HF-Bereich enthalten sollte. Für den Kern wird eine VR4-Verfeinerungsstufe verwendet.

Das zur Erzeugung der Einströmungsrandbedingung angewendete Verfahren ist rechts in Abbildung 4-32 dargestellt. Die innerhalb der rot gestrichelten Linien abgebildeten Prozesse werden angewendet, um ein nahtloses Geschwindigkeitsfeld über der rechtwinkligen Ebene (M) zu erzeugen, das die physikalischen Ausdehnungen des Messarrays (in der Ebene des Arrays) abdeckt. Die bei den Fahrversuchen mit Fahrzeug in Originalgröße gemessene Geschwindigkeit wird nur an den 11 Punkten, entsprechend der Sonden des Fahrzeugarrays, auf M definiert. Die Methode der radialen Basisfunktion (RBF) [79] wird eingesetzt, um das kontinuierliche Geschwindigkeitsfeld über M auf einer gleichmäßigen Punktverteilung mit einem Abstand von weniger als oder gleich der Hälfte des Abstands zwischen den Sonden zu approximieren. Dies ist erforderlich, um alle wellenartigen räumlichen Variationen des Messdatensatzes zuverlässig zu simulieren.

Es wird angenommen, dass die atmosphärische Grenzschicht unter neutralen Bedingungen das Logarithmus-Profil annimmt. Das Vorgehen für dessen Berechnung ist in der Prozessliste im blau gestrichelten Kasten dargestellt. Ein optimiertes Logarithmus-Profil wird erstellt, indem die Schubspannungsgeschwindigkeit ($u^s(t)$) an das Logarithmus-Profil aus Messungen der KF auf der Teststrecke angepasst wird. Die Oberflächenrauigkeit (z_0) und die Verdrängungsdicke (d) werden anhand der existierenden Literatur festgelegt [80]. Mit Hilfe dieses optimierten Logarithmus-Profils wird dann ein gemittelt Geschwindigkeitsprofil auf einer gleichmäßig verteilten Anordnung von Punkten mit beliebigem Abstand erzeugt.

Die interpolierten HF-Geschwindigkeitsfelder auf M werden mit einer Funktion gewichtet, die die Werte 1 in M und Null außerhalb von M annimmt. In ähnlicher Weise werden die Felder der atmosphärischen Grenzschicht mit einer Funktion gewichtet, die so konzipiert ist, dass sie die folgende funktionale Abhängigkeit von $r(x)$ aufweist, wobei $r(x)$ der Abstand von jedem Punkt auf der Grenze zum nächstgelegenen Grenzpunkt auf M ist: $W = 0$, wenn $r(x) = 0$ und $W = 1$, wenn $r(x) = \infty$, zum Beispiel $W(x) = \tanh(r(x))$. Die beiden Felder werden addiert. Anschließend wird das Geschwindigkeitsfeld mit einer linearen Transformation (L) auf die Grenzoberfläche B übertragen. Die Punkte in B liegen auf der rechnerischen Einströmfläche, werden aber nicht unbedingt auf die Flächenmittelpunkte oder die Scheitelpunkte des rechnerischen Begrenzungsnetzes abgebildet. Die Turbulenzniveaus im HF-Bereich können simuliert werden, indem fluktuierende Komponenten auf die gewünschte Turbulenzintensität skaliert werden. Derselbe Ansatz kann zur Einstellung der Turbulenzintensitäten einzelner Komponenten für die KF-Felder verwendet werden oder es kann eine isotrope Eddy-Viskosität genutzt werden, um die einströmende turbulente Eddy-Viskosität oder die turbulente kinetische Energie zu beeinflussen.

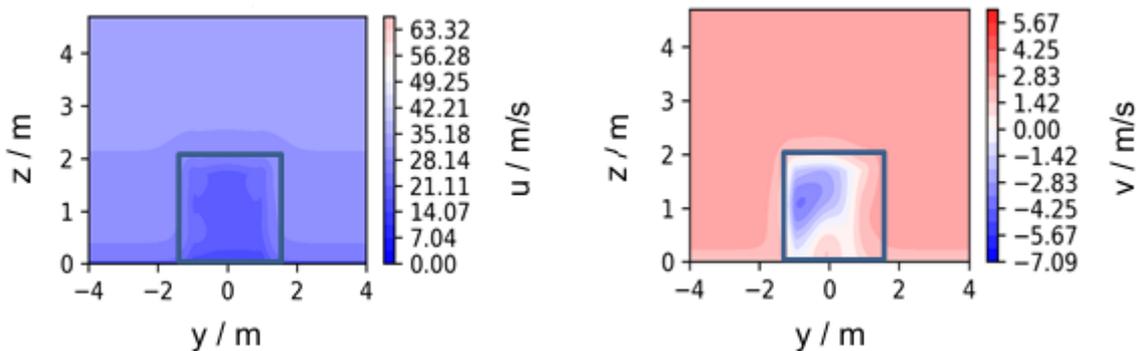


Abbildung 4-33: Die Abbildung zeigt die u-Komponente des Geschwindigkeitsfeldes (links) und die v-Komponente des Geschwindigkeitsfeldes (rechts) an der Strömungsgrenze. Der HF-Bereich wird durch den in beiden Abbildungen dargestellten rechteckigen Bereich begrenzt.

Abbildung 4-33 zeigt einen Teil von B (nach Abbildung und Neuskalierung der Geschwindigkeiten) zu einem beliebigen Zeitpunkt mit einem sauberen Übergang zwischen den KF- und HF-Bereichen (blauer Kasten). Die kleinskaligen Bewegungen, die im HF-Bereich erfasst werden, sind im KF-Bereich nicht vorhanden. Der Messbereich M ist groß genug, um einen ausreichenden Teil der Nachlaufströmungsdynamik zu erfassen. Dies ist jedoch für den KF-Bereich nicht möglich, da dort potenziell Strukturen in derselben Größenordnung wie im Bereich M oder sogar wesentlich größere Strukturen vorhanden sind. Aus diesem Grund wurde die KF-Beschreibung vereinfacht, sodass nur zeitabhängige Änderungen durch die Schubspannung vorliegen. Mit den begrenzten räumlichen Daten, die für das KF-Feld zur Verfügung standen, war es nicht möglich, kohärente Schätzungen der gesamten Grenzschichtdynamik zu erstellen. Für die vorliegende Studie ist diese Einschränkung jedoch vertretbar.

Simulation der Windkanalströmung mit bewegtem Klappensystem

Abbildung 4-34 zeigt die Geometrie, die für die Windkanalsimulationen mit geschlossener Messstrecke verwendet wurde. Die CAD-Geometrie basiert auf internen Daten des DLRs und wurde analog zu den CAD-Daten des HF-Falls bearbeitet. Die vorbereitete HF-Geometrie des Versuchsfahrzeugs wurde ebenfalls im Maßstab 1:4 auf die Modellversuche in der SWG übertragen. Bei ersten Tests mit der haus-eigenen Geometrie wurden mehrere Probleme identifiziert, deren Lösung viel Zeit in Anspruch genommen hätte, so dass ein Großteil der Berechnungen aus Zeitgründen mit dem skalierten HF-Modell durchgeführt wurde.

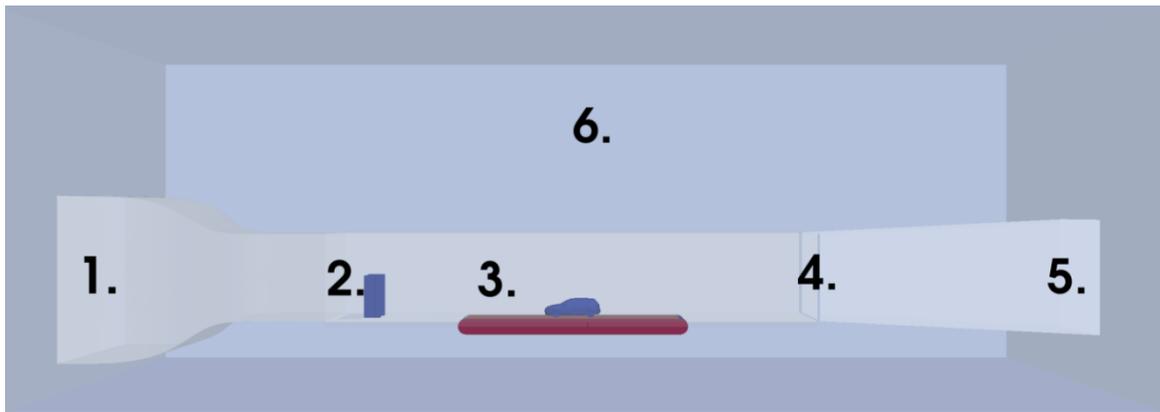


Abbildung 4-34: Blick auf die Rechendomäne für die Windkanalberechnungen: 1. Einlassebene an der Düse, 2. Klappensystem, 3. Band mit Grenzschichtabsaugung, 4. Öffnung für Druckausgleich, 5. Auslassebene, 6. Plenum.

Für die kritischen Bereiche des Berechnungsgebietes (einschließlich der Innen-/Außenflächen der Messstrecke, des Autos, der Reifen, des Transportbands und der Klappenprofile) wurden die zuvor beschriebenen Kriterien bei der Vernetzung der Geometrie angewendet. Die Grenzschichten an den Seitenwänden des Kanals und an der Decke wurden nicht aufgelöst, sodass die y^+ -Werte in diesen Bereichen in der Größenordnung von 200 - 300 lagen. Das bedeutet, dass die oberen Grenzen des gültigen y^+ -Bereichs für die Wandfunktionen verwendet wurden. Um das Grenzschichtwachstum innerhalb des Testabschnitts zuverlässig vorherzusagen, wurden das Plenum und ein Spalt für den Druckausgleich zwischen der Teststrecke und dem Ende der Teststrecke in der CAD-Geometrie berücksichtigt.

Der Spalt für den Druckausgleich erforderte zusätzliche Aufmerksamkeit während des Lösungsprozesses, da über diese Öffnung beginnende Instabilitäten erzeugt wurden. Es gibt verschiedene Möglichkeiten dieses Problem zu lösen. Der gewählte Ansatz besteht darin, eine Porositätsschicht über den Spalt zwischen dem Testabschnitt und dem Diffusor aufzutragen. Zu Beginn wurde die Porosität ausreichend hoch gewählt, sodass sich der Spalt wie eine feste Wand verhielt. Sobald die beginnenden Transienten konvergiert waren, wurde die Porosität reduziert, bis schließlich kein Strömungswiderstand mehr im Spaltbereich vorhanden war. Die Auflösung der Nachlaufstruktur stromabwärts der Klappen erwies sich als kritisch, sodass ein zusätzlicher Verfeinerungsbereich (analog zu R1 in Abbildung 2) eingeführt wurde, um sicherzustellen, dass die numerische Dissipation niedrig genug war und dass die Nachlaufstruktur stromabwärts der Klappen bis zum Fahrzeugmodell erhalten blieb.

Für die Simulation der beweglichen Klappen wurde sowohl die Overset-Methode als auch die Sliding-Mesh-Methode getestet (die Klappen wurden sinusförmig mit einer Frequenz von 10 Hz und 10 Grad Amplitude bewegt). Da die Oberflächendruckfelder mit der Overset-Methode nicht zuverlässig erzeugt werden konnten, wurde konsequent der Sliding-Mesh-Ansatz angewendet. Die Rotation der Räder des Modells und des Transportbands, das die Räder bewegt, wurde mit Hilfe von OpenFOAM-Randbedingungen für rotierende Wände, die speziell für die Automobilindustrie entwickelt wurden, simuliert. Diese Randbedingungen basieren auf Quelltermen für rotierende Wände.

Validierung der CFD-Simulation mit Klappensystem

Die Simulationen der Strömung im Windkanal wurden durch den Vergleich mit den Ergebnissen der Windkanalmessungen validiert. In Simulationen wurde zunächst die durch das Klappensystem bei einer leeren Messstrecke induzierten Strömungsfelder evaluiert, um die Eignung der gewählten numerischen Schemata zu prüfen. Wie im vorherigen Abschnitt beschrieben, wurde hierfür als Flapbewegung eine sinusförmige Schwingung mit 10° Maximalausschlag und 10 Hz Flapfrequenz gewählt.

Die Anströmgeschwindigkeit im Windkanal wurde auf 27,8 m/s eingestellt. Aufgrund der Blockierung durch die Klappenanordnung betrug die mittlere Anströmgeschwindigkeit jedoch tatsächlich ~ 30 m/s. Validierungsberechnungen wurden für den leeren Kanal, den Kanal mit statischen Klappen, den Kanal mit beweglichen Klappen sowie für die gesamte Konfiguration durchgeführt. Abbildung 4-35 zeigt die Entwicklung der Quergeschwindigkeitskomponente v (in der Ebene des stromaufwärts positionierten Messarrays in einer Höhe von 0,125 m über dem Windkanalboden) über eine Dauer von 8 Perioden der Klappen. Es zeigt sich eine gute Übereinstimmung zwischen experimentellen (M) und berechneten (C) Ergebnissen, sowohl in der Amplitude als auch bei der räumlichen Verteilung des periodischen Wechsels zwischen negativen und positiven Werten für die Quergeschwindigkeit v über die Zeit.

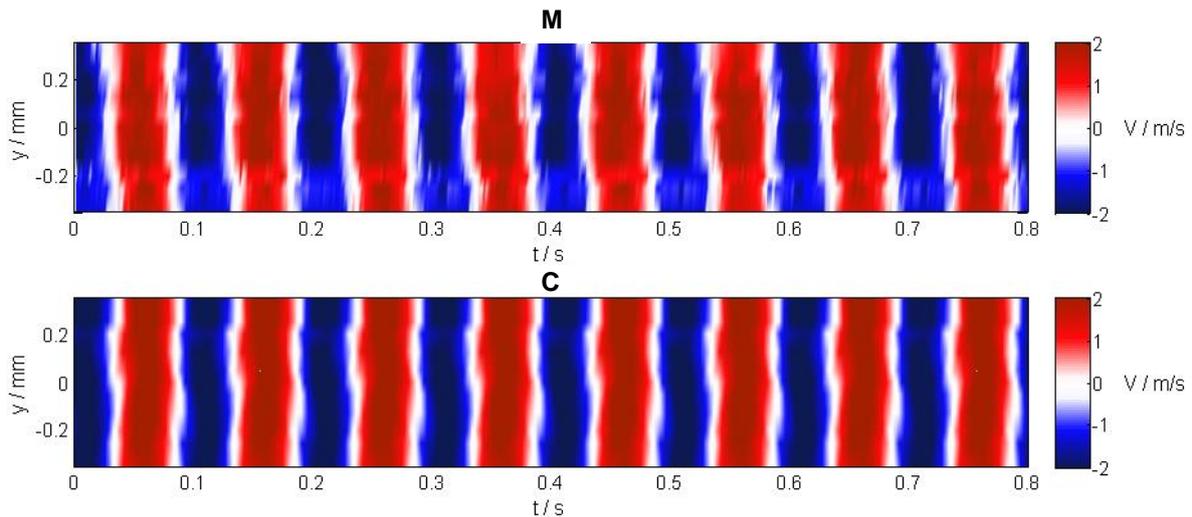


Abbildung 4-35: Die Abbildung zeigt für die v -Komponente der Geschwindigkeit eine gute Übereinstimmung zwischen dem gemessenen und dem berechneten Feld in der Ebene des Messarrays.

5 Ergebnisse der Fahrversuche

Die Ergebnisse der Fahrversuche stellen die Grundlage zur Charakterisierung der instationären Aerodynamik dar und werden verwendet um die Randbedingungen für Windkanalmessungen und numerische Simulationen zu quantifizieren. Dafür wurden die Untersuchungen unter den vorgestellten Randbedingungen auf den öffentlichen Autobahnen, der Teststrecke und an der Seitenwindanlage ausgewertet. Die Ergebnisse sind im Folgenden dargestellt.

5.1 Straßenfahrt auf der öffentlichen Autobahn

Aus den Fahrversuchen auf der öffentlichen Autobahn wurden vier charakteristische Kompassfahrten mit verschiedenen Verkehrsdichten ausgewählt. Diese haben die Verkehrsdichten: *sehr gering*; *gering*; *mittel* und *hoch*. Diese vier Kompassfahrten stellen ein repräsentatives Kollektiv dar. Dieses Kollektiv wurde zusätzlich in vier Fahrgeschwindigkeitskategorien eingeteilt: 22,2; 27,8; 33,3 und 38,9 m/s. Dabei besteht jede Kategorie für einen Geschwindigkeitsbereich von $\pm 1,4$ m/s (± 5 km/h). Die Kategorien der Fahrgeschwindigkeiten sind in Tabelle 5-1 beschrieben.

Tabelle 5-1: Kategorien der Fahrgeschwindigkeiten der Straßenfahrt.

Fahrgeschwindigkeitskategorie	22,2 m/s	27,8 m/s	33,3 m/s	38,9 m/s
Fahrgeschwindigkeitsbereich	20,8 – 23,6 m/s°	26,4 – 29,2 m/s	31,9 – 34,7 m/s	37,5 – 40,3 m/s

5.1.1 Anströmwinkel

Die während der Straßenfahrt auftretenden Anströmwinkel können mit einer Normalverteilung beschrieben werden. In Abbildung 5-1 ist das Histogramm der Anströmwinkel für das Kollektiv in der Fahrgeschwindigkeitskategorie 27,8 m/s und die zugehörige Normalverteilung dargestellt.

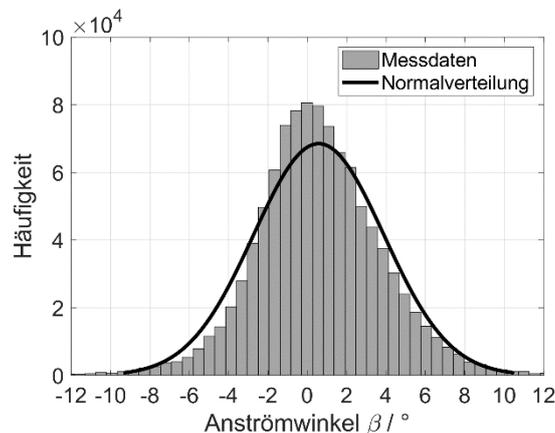


Abbildung 5-1: Histogramm und die zugehörige Normalverteilung der Anströmwinkel bei einer Fahrgeschwindigkeit von $v_F = 27,8$ m/s der vier Kompassfahrten.

Eine Normalverteilung kann mit zwei Kenngrößen beschrieben werden. Der Mittelwert μ quantifiziert die Verschiebung der Normalverteilung auf der x-Achse und die Standardabweichung σ definiert, mit den Grenzen $\pm\sigma$, einen Wertebereich in dem 68 % der auftretenden Werte liegen. Folglich liegen etwa 2/3 der auftretenden Anströmwinkel im Bereich von $\pm\sigma$. Mit zunehmender Standardabweichung nimmt die Breite der Normalverteilung zu und der Maximalwert sinkt. Unter Berücksichtigung dieses Zusammenhangs können verschiedene Normalverteilungen sehr gut verglichen werden. Im Folgenden wird die Charakterisierung der Anströmwinkel auf Basis der jeweiligen Normalverteilungen durchgeführt.

Die für das Kollektiv in den Fahrgeschwindigkeitskategorien auftretenden Anströmwinkel sind in Abbildung 5-2 (links) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die auftretenden Anströmwinkel von der Fahrgeschwindigkeit abhängen. Mit steigender Fahrgeschwindigkeit verringert sich die Standardabweichung der Normalverteilung von $4,8^\circ$ auf $1,5^\circ$ (siehe Tabelle 5-2). Dieser Zusammenhang deutet auf gleichbleibende Strömungsgeschwindigkeiten in Querrichtung zum Versuchsfahrzeug bei steigender Fahrgeschwindigkeit hin. Unter dieser Annahme stellt sich das beschriebene Verhalten der Messergebnisse ein. Die horizontale Verschiebung der Normalverteilungen ist sowohl positiv als auch negativ, und ein Anstieg der Fahrgeschwindigkeit bewirkt tendenziell einen abnehmenden Mittelwert.

Tabelle 5-2: Standardabweichungen und Mittelwerte der Normalverteilungen der Anströmwinkel für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten der Kompassfahrten.

Fahrgeschwindigkeit (v_F)	22,2 m/s	27,8 m/s	33,3 m/s	38,9 m/s
Standardabweichung (σ)	4,8°	3,3°	2,2°	1,5°
Mittelwert (μ)	2,3°	0,6°	0,1°	-0,3°

Während der Fahrversuche erfährt das Versuchsfahrzeug eine Vielfalt von verschiedenen Anströmsituationen, ausgelöst durch natürlichen Wind oder andere Verkehrsteilnehmer. Fahrzeuge auf anderen Spuren oder das Überholen eines Fahrzeugs kann den Anströmwinkel beeinflussen [81, 82]. Diese singulären Einflüsse waren jedoch nicht Ziel dieser Betrachtungen, stattdessen wurde der Fokus auf die Ermittlung der durchschnittlichen Anströmbedingungen bei der Autobahnfahrt gelegt.

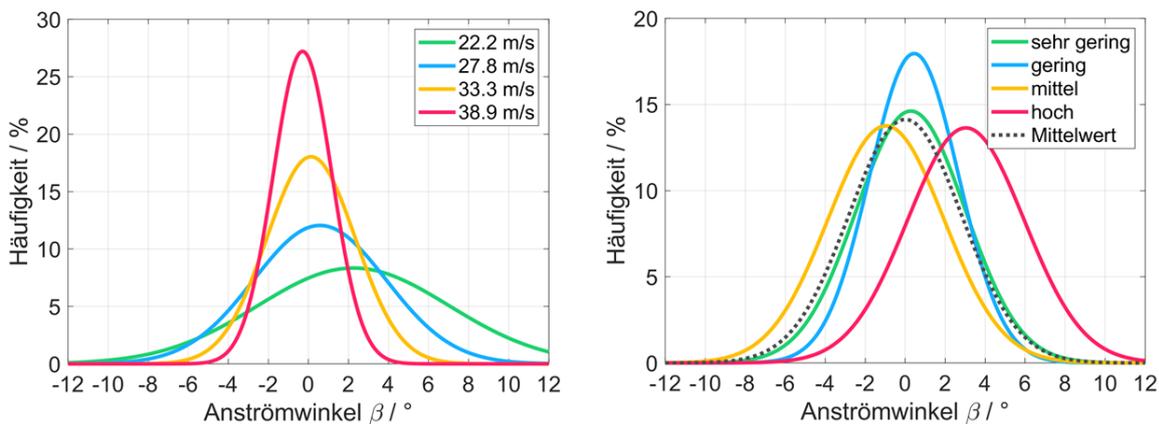


Abbildung 5-2: Normalverteilungen für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten der Kompassfahrten (links) und für die verschiedenen Verkehrsdichten bei einer Fahrgeschwindigkeit von $v_F = 27,8$ m/s (rechts).

Der Anströmwinkel zeigt neben der Abhängigkeit von der Fahrgeschwindigkeit auch einen Zusammenhang mit der Verkehrsdichte. In Abbildung 5-2 (rechts) sind die Normalverteilungen der Verkehrsdichten für eine Fahrgeschwindigkeit von 27,8 m/s dargestellt. Die Standardabweichung der Anströmwinkel steigt tendenziell mit zunehmender Verkehrsdichte von $2,2^\circ$ bis $2,9^\circ$ (siehe Tabelle 5-3). Die Mittelwerte der verschiedenen Verkehrsdichten zeigen keinen eindeutigen Trend. Die Verkehrsdichte der Kategorie *gering* zeigt die geringste Standardabweichung. Diese Kompassfahrt wurde an einem Sonntag durchgeführt und aufgrund des Fahrverbotes an Sonn- und Feiertagen ohne signifikanten Einfluss von Lkws. Dieser Zusammenhang deutet darauf hin, dass sowohl die Verkehrsdichte, als auch die Fahrzeuggröße einen Einfluss auf die Anströmwinkel im Straßenverkehr hat. Der Luftwiderstandsbeiwert eines Fahrzeugs steigt mit zunehmender Schräganströmung. Die Messergebnisse zeigen steigende Anströmwinkel mit zunehmender Verkehrsdichte. Aufgrund der Schräganströmung erhöht sich der Energieaufwand eines Fahrzeugs im Straßenverkehr.

Tabelle 5-3: Standardabweichungen und Mittelwerte der Normalverteilungen der Anströmwinkel für verschiedene Verkehrsdichten der Kompassfahrten.

Verkehrsdichte	<i>sehr gering</i>	<i>gering*</i>	<i>mittel</i>	<i>hoch</i>	<i>Durchschnitt</i>
Standardabweichung (σ)	2,7°	2,2°	2,9°	2,9°	2,8°
Mittelwert (μ)	0,3°	0,5°	-1,0°	3,0°	0,0°

*Versuchsfahrt an einem Sonntag durchgeführt; ohne Lkws.

5.1.2 Anströmgeschwindigkeit

Die Strömungssituation, die ein Straßenfahrzeug erfährt, weicht von der theoretisch homogenen Strömungssituation ab. In der theoretischen Fahrsituation ohne die Beeinflussung durch z.B. Wind oder Verkehr, ist die Anströmgeschwindigkeit gleich der Fahrgeschwindigkeit. Im Straßenverkehr wird diese Bedingung jedoch nur sehr selten erfüllt. Aus diesem Grund wurde die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeiten, die das kalibrierte Versuchsfahrzeug während der Fahrversuche erfahren hat, bestimmt.

Um einen Vergleich der auftretenden Anströmgeschwindigkeit mit der Fahrgeschwindigkeit für die Geschwindigkeitskategorien zu ermöglichen wird die normierte Anströmgeschwindigkeit v_{A^*} eingeführt. Da jede Geschwindigkeitskategorie, wie in Kapitel 5.1 definiert, für einen Geschwindigkeitsbereich von $\pm 1,4$ m/s (± 5 km/h) steht, ist eine Normierung notwendig.

Die einzelnen Anströmgeschwindigkeiten $v_{A,i}$ werden mit dem Quotienten aus der mittleren Fahrgeschwindigkeit \bar{v}_F und dem Inkrement der aktuellen Fahrgeschwindigkeit $v_{F,i}$ multipliziert. Dies ergibt die normierte Anströmgeschwindigkeit v_{A^*} und ist für ein Zeitinkrement i definiert als:

$$v_{A^*,i} = \frac{\bar{v}_F}{v_{F,i}} \cdot v_{A,i}$$

Das Verhältnis der normierten Anströmgeschwindigkeit v_{A^*} und der Fahrgeschwindigkeit v_F zeigt ebenfalls eine Normalverteilung (siehe Abbildung 5-3). Die Standardabweichung der Normalverteilung beträgt 0,099. Dies ergibt, für die normierte Anströmgeschwindigkeit bei einer Fahrgeschwindigkeit von 27,8 m/s, eine Standardabweichung von 2,8 m/s. Das bedeutet, dass die Anströmgeschwindigkeit im Vergleich zur Fahrgeschwindigkeit variiert. Dieser Effekt wird hauptsächlich durch vorausfahrende Fahrzeuge und natürlicher Wind hervorgerufen.

Der Mittelwert der Normalverteilung liegt bei 0,84 und entspricht einer Reduktion der Anströmgeschwindigkeit von 16 %. Die Anströmgeschwindigkeit wird damit bei einer Fahrgeschwindigkeit von 27,8 m/s um 4,6 m/s auf 23,2 m/s reduziert. Die Verringerung der Anströmgeschwindigkeit wird dabei in erster Linie durch vorausfahrende Fahrzeuge verursacht.

Für eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse verschiedener Fahrgeschwindigkeiten wurden die Parameter der Geschwindigkeitsverhältnisse v_{A^*}/\bar{v}_F analog der beschriebenen Vorgehensweise ausgewertet und im Bereich von 22,2 bis 38,8 m/s in Abbildung 5-3 (rechts) zusammengefasst.

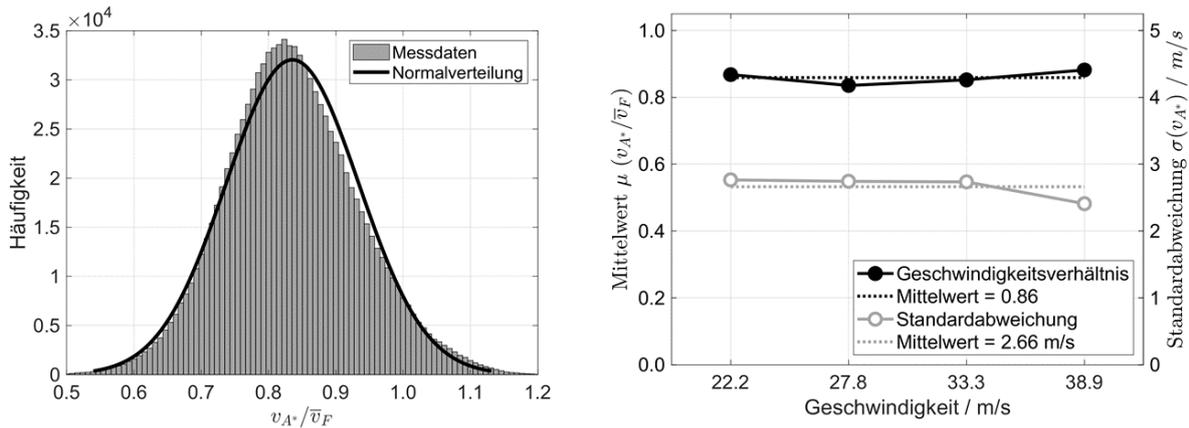


Abbildung 5-3: Histogramm des Geschwindigkeitsverhältnis bei $v_F = 27,8$ m/s des gesamten Kollektivs (links) und die aus den Normalverteilungen resultierenden Mittelwerte und Standardabweichungen für die vier Fahrgeschwindigkeiten (rechts).

Das Geschwindigkeitsverhältnis und die Standardabweichung sind bei steigender Geschwindigkeit nahezu konstant und zeigen die gleichen Effekte, wie am Beispiel der Kategorie 27,8 m/s beschrieben. Die bei der Straßenfahrt erfassten Anströmbedingungen lassen sich mit einer mittleren Verringerung der Anströmgeschwindigkeit um 14 % und einer Standardabweichung von 2,66 m/s beschreiben. Die reduzierte Anströmgeschwindigkeit wirkt sich auf den Luftwiderstandsbeiwert aus und reduziert diesen. Der Einfluss der Anströmgeschwindigkeit ist quadratisch und wirkt sich für die dargestellten Bereiche deutlich stärker auf den Luftwiderstandsbeiwert aus, als die Steigerung durch Schräganströmung.

5.1.3 Turbulenzintensität und integrales Längenmaß

Zusätzlich zur Verteilung der Anströmwinkel und den herrschenden Anströmgeschwindigkeiten soll die Anströmung mit der Turbulenzintensität Tu und dem integralen Längenmaß L charakterisiert werden. Diese beiden Kennwerte werden mit den Messdaten der beiden Vierloch-Strömungssonden an der Fahrzeugfront ermittelt. Der Turbulenzgrad beschreibt die Intensität der Schwankungen in der Anströmung, während das integrale Längenmaß die mittlere statistische Größe der in turbulenter Strömung vorgefundenen Wirbel beschreibt.

Die Größen werden für beide Strömungssonden mit einer Blocklänge von vier Sekunden berechnet und als Mittelwert der beiden Strömungssonden dargestellt. Mit diesen Randbedingungen können im betrachteten Geschwindigkeitsbereich Längenskalen von 0,15 bis 83,00 m aufgelöst werden. Da die Anströmgeschwindigkeit bei der Berechnung der turbulenten Variablen berücksichtigt wird können die turbulenten Größen im gesamten Geschwindigkeitsbereich miteinander verglichen werden. Aus diesem Grund werden die turbulenten Größen für die Messergebnisse des gesamten Geschwindigkeitsbereichs von 20,83 bis 40,28 m/s dargestellt (siehe Abbildung 5-4).

Die Turbulenzintensität und das integrale Längenmaß sind x-Richtung, also in Fahrtrichtung, und in y-Richtung, quer zur x-Richtung, dargestellt.

Jeder Datenpunkt beschreibt die turbulenten Größen eines 4 Sekunden langen Zeitabschnittes und seine Farbe gibt Auskunft über die Häufigkeit vergleichbarer Werte. Die Charakteristik der Anströmung die das Versuchsfahrzeug in x- und y-Richtung während der Messungen erfährt, kann als eine Strömung mit mittlerer Turbulenz und geringen Längenskalen beschrieben werden. Der größte Teil der x-Richtung liegt im Bereich von Tu_x von 2 bis 12 % bei L_x von 0,25 bis 4 m. Bei der Turbulenzintensität Tu_y liegen die Werte größtenteils im Bereich von 3 bis 13 % bei integralen Längenmaßen L_y zwischen 0,25 und 4,5 m.

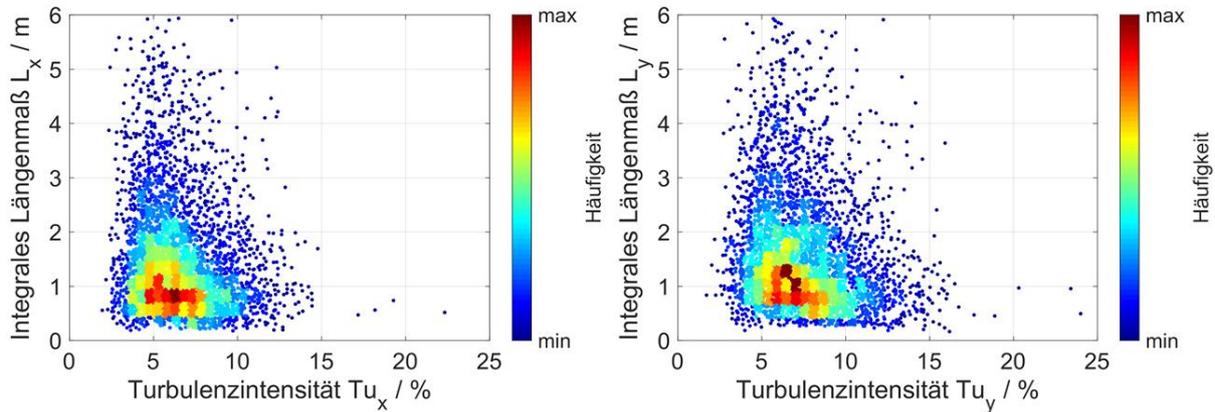


Abbildung 5-4: Turbulenzintensität und integrales Längenmaß der Kompassfahrt und deren Häufigkeit für die x-Richtung (links) und die y-Richtung (rechts).

Für beide Richtungen zeigt bei der Turbulenzintensität der Bereich von 5 bis 7 % mit einem integralen Längenmaß von etwa einem Meter die höchste Häufigkeit. Diese Ergebnisse tragen dazu bei, die Anströmsituation der Straßenfahrt in den Windkanal und die numerische Simulation zu übertragen. Diese werden als Vergleichsparameter der instationären Anströmung verwendet. Die beschriebenen Ergebnisse stehen in guter Übereinstimmung mit den von Wordley [6, 10] und McAuliffe [12, 37] durchgeführten Messungen auf Autobahnen.

Es ist festzustellen, dass auf den betrachteten Autobahnen in Deutschland hohe Turbulenzintensitäten mit hohen Längenskalen sehr selten auftreten. Bei Wetterbedingungen mit starken Winden könnte sich die dargestellte Charakteristik der turbulenten Anströmung jedoch ändern.

5.1.4 Oberflächendruckverteilung und -schwankungen

Die Strömung um ein Fahrzeug kann durch die Druckverteilung und -fluktuationen auf der Fahrzeugoberfläche charakterisiert werden. Um trotz schwankender Umweltbedingungen vergleichbare Ergebnisse zu erhalten wird aus dem gemessenen Oberflächendruck der dimensionslose Druckbeiwert c_p abgeleitet.

Während der mittlere Druckbeiwert \bar{c}_p die Druckverteilung auf der Fahrzeugoberfläche beschreibt, charakterisiert $c_{p,rms}$ die Schwankung des Oberflächendrucks und kann Einblicke in das instationäre Verhalten der Fahrzeugumströmung geben.

Eine Übersicht der mittleren Druckbeiwerte \bar{c}_p auf der Oberfläche des Versuchsfahrzeugs für alle Messpunkte des gesamten Kollektivs bei einer Fahrgeschwindigkeit v_F von 27,8 m/s ist in Abbildung 5-5 dargestellt. Die Druckbeiwerte erreichen an der Fahrzeugfront im Bereich des Staupunktes das Maximum. Der Basisdruck zeigt eine gleichmäßige Verteilung und es sind keine großen Ausreißer zu erkennen.

In folgenden Abbildungen ist das Versuchsfahrzeug ohne Antenne dargestellt. Positioniert ist diese im hinteren Bereich des Fahrzeugdachs mittig zwischen den beiden letzten Oberflächendruckmesspunkten, weshalb diese beiden Punkte teilweise ein etwas auffälliges Verhalten zeigen. Da dieses jedoch ausschließlich auf die Beeinflussung durch die Antenne zurückzuführen ist, wird darauf im Folgenden nicht weiter eingegangen.

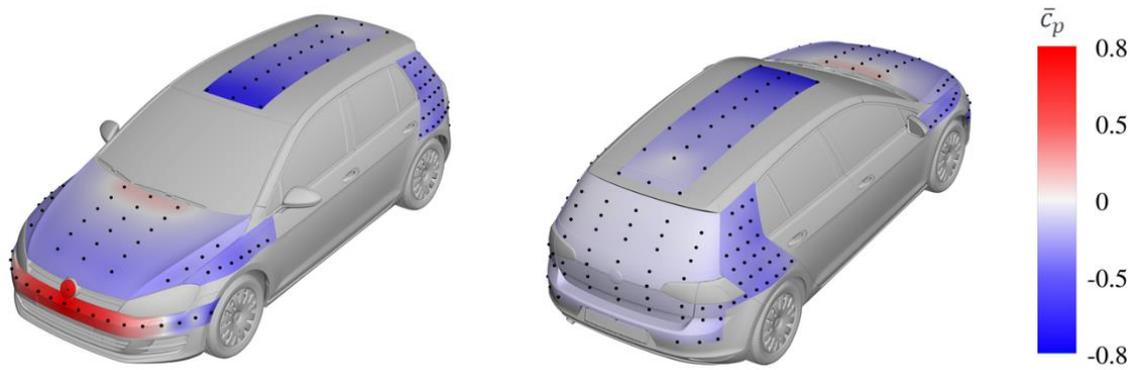


Abbildung 5-5: Verteilung des mittleren Druckbeiwerts c_p auf der Fahrzeugoberfläche des Versuchsfahrzeugs der Kompassfahrten für eine Fahrgeschwindigkeit von $v_F = 27,8$ m/s aus der Vorder- (links) und Rückansicht (rechts) | die schwarzen Punkte markieren die Positionen der Messstellen auf der Fahrzeugoberfläche.

Die mittleren Schwankungen der Druckbeiwerte $\bar{c}_{p,rms}$ sind in Abbildung 5-6 dargestellt. Bereiche mit starken Schwankungen befinden sich an der Front des Fahrzeugs und im vorderen Bereich des Dachs. Die Schwankungen des Druckbeiwertes auf der Grundfläche des Fahrzeugs zeigen ebenfalls eine gleichmäßige Verteilung und im Vergleich zur Fahrzeugfront geringere Werte.

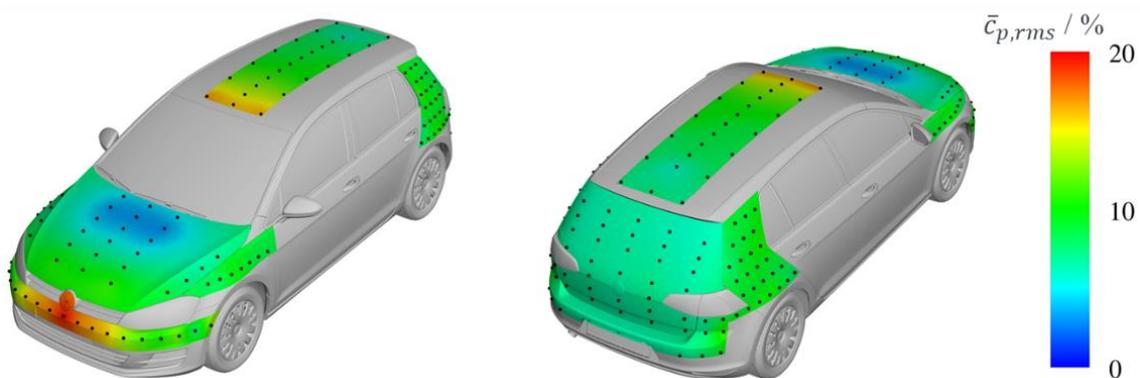


Abbildung 5-6: Verteilung der mittleren Schwankung des Druckbeiwerts $c_{p,rms}$ auf der Fahrzeugoberfläche des Versuchsfahrzeugs der Kompassfahrten für eine Fahrgeschwindigkeit von $v_F = 27,8$ m/s aus der Vorder- (links) und Rückansicht (rechts) | die schwarzen Punkte markieren die Positionen der Messstellen auf der Fahrzeugoberfläche.

Eine detaillierte Analyse der Druckverteilung und Fluktuation wird im Folgenden vorgestellt. Die Konstantfahrt auf der Teststrecke ohne andere Verkehrsteilnehmer wird dabei als Vergleichsfall verwendet.

Um eine qualitativ bessere Bewertung der Ergebnisse zu ermöglichen, wird in den folgenden Abschnitten eine Auswahl der Oberflächendruckbeiwerte und -schwankungen in Einzelansicht dargestellt. Die Ergebnisse werden mit Hilfe von vier Ansichten diskutiert. Dies sind Messergebnisse in der Fahrzeugmittelebene und zwei Schnitte der z-Ebene an Front und Heck.

In Abbildung 5-7 ist eine dieser Ansichten dargestellt. Das Versuchsfahrzeug ist im Hintergrund des Diagramms dargestellt und die Oberflächendruckmesspunkte sind als dunkelgraue Punkte auf der Oberfläche eingezeichnet. Die Position der Oberflächendruckmessstelle werden über eine Achse beschrieben und mit der anderen Achse die Ergebnisse der mittleren Druckbeiwerte und deren Schwankungen. Die mittleren Druckbeiwerte sind dabei mit kontinuierlichen Linien und ausgefüllten Markierungen \bullet (linke y-Achse / obere x-Achse) dargestellt und die mittleren Druckbeiwert Schwankung mit gestrichelter Linien und Markierungen ohne Füllung \circ (rechte y-Achse / untere x-Achse).

In Abbildung 5-7 sind die Druckbeiwerte und deren Schwankungen (für Motorhaube/Dach und Heck) entlang der Mittellinie bei $y = 0$ unter verschiedenen Verkehrsbedingungen dargestellt.

Der Punkt mit der geringsten Schwankung ist der Referenzdruckpunkt P1 oder p_{ref} . In Ergänzung zu den bereits in Kapitel 4.1.1 beschriebenen Eigenschaften qualifiziert dies den Messpunkt P1 weiter als Referenzmessstelle. Folglich ist der Druckbeiwert an der Referenzmessstelle für alle Verkehrsdichten als Null definiert. Die Erhöhung des mittleren Druckbeiwertes \bar{c}_p bei $x = 2580$ mm wird durch die beschriebene Fahrzeugantenne verursacht. Diese Erhöhung ist in allen Messergebnissen vorhanden.

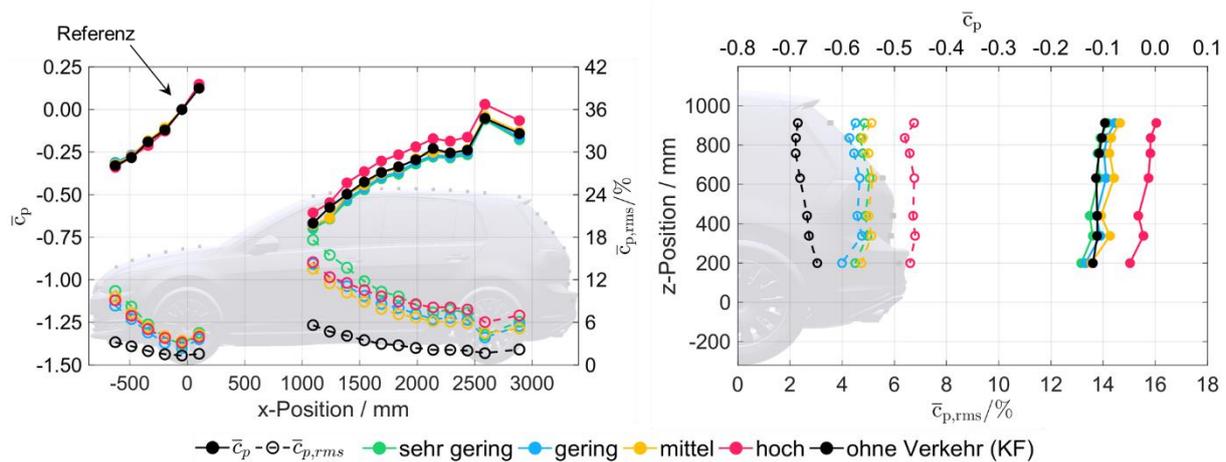


Abbildung 5-7: Mittlere Druckbeiwerte und deren Schwankung entlang des Mittelschnitts der Fahrzeugmotorhaube und des -dachs (links) und im Mittelschnitt des Fahrzeughecks (rechts) bei $v_F = 27,8$ m/s.

Entlang der Motorhaube und des Dachs sind in Richtung $+x$ steigende Druckbeiwerte \bar{c}_p festzustellen. Dieser Trend ist für alle Verkehrsbedingungen nahezu identisch und zeigt vergleichbare Ergebnisse zur Konstantfahrt ohne Verkehr. Lediglich die Verkehrsdichte *hoch* unterscheidet sich im Dachbereich von den anderen Kategorien. Dies kann auf die erhöhte Verkehrsdichte und die damit verbundene größere Anzahl an Fahrzeugen zurückgeführt werden. Im Vergleich zu den anderen Ergebnissen erfährt das Fahrzeug bei diesen Anströmbedingungen unter Umständen eine reduzierte Anströmgeschwindigkeit im Dachbereich relativ zur Motorhaube. Ebenfalls kann ein verstärkter Einfluss auf die Fahrzeugfront die Ursache dieser Unterscheide sein.

Im Bereich des Fahrzeughecks zeigt sich ein ähnliches Verhalten wie im Dachbereich. Dort zeigen die Konstantfahrt ohne Verkehr und die Fahrt auf öffentlichen Autobahnen mit verschiedenen Verkehrsdichten vergleichbare Ergebnisse. Eine Ausnahme bildet die Verkehrsdichte *hoch*, die höhere Druckbeiwerte als die übrigen Messfahrten zeigt. Während der Fahrt in dichtem Verkehr befindet sich eine größere Anzahl an Verkehrsteilnehmern um das Versuchsfahrzeug. Dies kann neben der Anströmung auch den Basisdruck beeinflussen. Fährt ein anderer Verkehrsteilnehmer dicht hinter dem Versuchsfahrzeug steigt der Druckbeiwert am Heck an. Dieser Effekt ist möglicherweise die Ursache dieser Abweichung. Solche Strömungszustände beeinflussen den Luftwiderstandsbeiwert ebenfalls. Neben der reduzierten Anströmgeschwindigkeit verringert ein steigender Basisdruck ebenfalls den Luftwiderstand.

Die Ergebnisse der Druckschwankung im Mittelschnitt des Fahrzeugs, siehe Abbildung 5-7, zeigen einen deutlichen Unterschied zwischen dem Fahren auf öffentlichen Autobahnen und der Konstantfahrt ohne Verkehr auf der Teststrecke. Es zeigt sich eine Differenz von bis zu 12 Prozentpunkten, um die die Schwankung auf der Straße im Vergleich zur Konstantfahrt erhöht ist. Die maximale Abweichung kann an Bereichen festgestellt werden, die der freien Strömung ausgesetzt sind. Andere Verkehrsteilnehmer

induzieren eine turbulente Strömung, die zuerst auf diese Bereiche trifft und die größten Schwankungen verursacht.

Ein z-Schnitt an der Fahrzeugfront bei 220 mm und am Fahrzeugheck bei 440 mm vom Ursprung des Fahrzeugkoordinatensystems ist Abbildung 5-8 dargestellt. Der mittlere Druckbeiwert der Front zeigt ein vergleichbares Verhalten zu den Messungen ohne Verkehr, während die Ergebnisse am Heck eine größere Abweichung, insbesondere bei Verkehrsdichte *hoch* aufweisen. Der Unterschied verdeutlicht sich beim Vergleich der Druckbeiwerte der Konstantfahrt ohne Verkehr und der Verkehrsdichte *hoch* und wurde bereits im Mittelschnitt am Fahrzeugheck diskutiert.

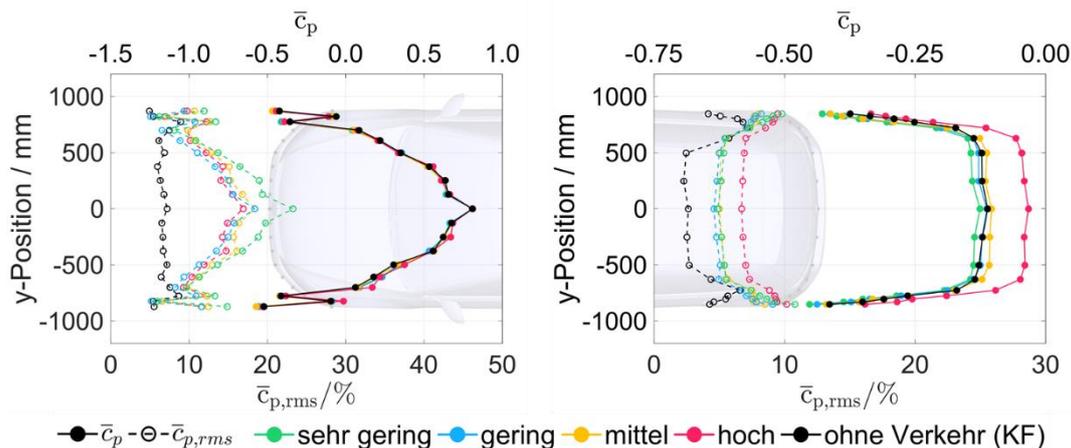


Abbildung 5-8: Mittlere Druckbeiwerte und deren Schwankung für den z-Schnitt (220 mm) an der Fahrzeugfront (links) und den z-Schnitt (440 mm) am Fahrzeugheck (rechts) bei $v_F = 27,8$ m/s.

Die Druckschwankungen, die das Versuchsfahrzeug an der Front erfährt, zeigen unterschiedliche Ergebnisse. Während das Ergebnis ohne Verkehr eine vergleichbare Größenordnung mit einem Maximum im Seitenbereich hat, zeigen die Ergebnisse mit Verkehr ein Maximum in der Mitte des Fahrzeugs, aber auch lokale Maxima im Seitenbereich. Dies wird möglicherweise durch den instationären Nachlauf (Strömung mit geringem Luftdruck) vorausfahrender Verkehrsteilnehmer verursacht, der auf das Versuchsfahrzeug trifft.

Am Fahrzeugheck sind für die Fahrsituationen mit Verkehr ebenfalls größere Schwankungen der Druckbeiwerte zu erkennen. Zusätzlich verändert sich hier, wie an der Fahrzeugfront, der Verlauf der Werte. Bei der Konstantfahrt ohne Verkehr kann im Seitenbereich des Fahrzeugs ein deutlich ausgeprägter Peak identifiziert werden, während bei den Messungen mit Verkehr dieser Peak verschwindet und sich stattdessen ein größerer Bereich mit hohen Druckschwankungen bildet. Dies deutet darauf hin, dass der, bei Konstantfahrt oder im Windkanal, klar definierte Strömungsabriss am Fahrzeugheck bei der Fahrt im Verkehr nicht mehr vorhanden ist, sondern die Strömung in Abhängigkeit von den ständig wechselnden Umgebungsbedingungen an verschiedenen Punkten abreißt. Dies kann durch Verkehrsteilnehmer auf den anderen Fahrspuren oder instationäre Anströmeffekte verursacht werden.

5.2 Hinterherfahrt auf der DLR-Teststrecke

Neben den allgemeinen Strömungsbedingungen im Straßenverkehr, waren für die vorliegende Studie die Strömungsbedingungen für spezifische Fahrmanöver von Interesse, um den Einfluss anderer Verkehrsteilnehmer auf die Anströmung in bestimmten Fahrsituationen besser zu verstehen. Eines der untersuchten Manöver war die Hinterherfahrt, da es sich dabei um eine häufig vorkommende Verkehrssituation handelt. Um überlagernde Effekte aus dem Straßenverkehr (z.B. weitere Verkehrsteilnehmer

und Straßenrandobjekt) für die Hinterherfahrt auszuschließen und um eine gute Reproduzierbarkeit der Messergebnisse zu gewährleisten, wurden die Fahrmanöver auf der DLR-Teststrecke in Trauen durchgeführt. So konnten die Anströmbedingungen (z.B. Anströmgeschwindigkeiten, Periodizität oder Korrelationen in der Strömung) eindeutig der Hinterherfahrt und den unterschiedlichen Abständen zwischen den Fahrzeugen zugeordnet werden. Durch die Fokussierung auf ein ausgewähltes Fahrmanöver war eine gute Beschreibung der Anströmung während der Hinterherfahrt möglich. Die Hinterherfahrt erfolgte bei verschiedenen aber gleichbleibenden Abständen zwischen 10 m und 100 m zu dem mit konstanter Geschwindigkeit vorausfahrenden Fahrzeug.

5.2.1 Eigenschaften der Anströmung

Auftretende Turbulenzintensität und integrales Längenmaß

Zur Beschreibung der während der Fahrversuche vorliegenden Strömung vor dem Fahrzeug werden zunächst die in der Literatur üblichen Größen der Turbulenzintensität und der integralen Längenmaße herangezogen (siehe z.B. Wordley [10] oder McAuliffe [12]). Im Folgenden werden für die Hinterherfahrt zunächst die Zusammenhänge zwischen den Turbulenzintensitäten und Längenmaßen der Geschwindigkeitskomponenten bei unterschiedlichen Fahrzeugabständen betrachtet. Mit Hilfe der Turbulenzintensitäten werden die statistischen Schwankungen der Geschwindigkeit beschrieben, während das integrale Längenmaß ein Indikator für die Größe der Strukturen in der Strömung herangezogen wird.

Abbildung 5-9 zeigt die integralen Längenmaße über den jeweiligen Turbulenzintensitäten für die verschiedenen Geschwindigkeitskomponenten. Die Ergebnisse für die u-Komponente sind links, für die v-Komponente in der Mitte und für die w-Komponente rechts aufgetragen. Es sind die unterschiedlichen Abstände (farbige Markierungen) bei einer Fahrgeschwindigkeit von $v_F = 27,8$ m/s (100 km/h) angegeben. Zusätzlich sind für die gleichen Sonderpositionen die Ergebnisse der Konstantfahrt als Referenz (schwarze Markierungen) eingetragen. Die Markierungen spiegeln die über die Messzeit gemittelten Werte für jede einzelne der 11 Fünflochsonden des Arrays wider.

Für alle Geschwindigkeitskomponenten ergibt sich eine Abnahme des Längenmaßes mit geringer werdendem Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug. In x- und y-Richtung werden bei der Konstantfahrt dabei Längenmaße von bis zu 25 m erreicht. Bei der Konstantfahrt erreicht L_x im Durchschnitt eine Länge von 6 m, während L_y eine durchschnittliche Länge von 5 m annimmt. Dagegen ist L_z mit einer durchschnittlichen Länge von 1 m deutlich kürzer. Die mittleren Werte der Längenmaße reduzieren sich bei einem Fahrzeugabstand von 10 m auf 0,3 m in x- und auf 0,2 m in y- und z-Richtung. Die Turbulenzintensitäten nehmen hingegen mit dem geringer werdenden Fahrzeugabstand für alle 3 Geschwindigkeitskomponenten zu. Während in x- und y-Richtung mittlere Turbulenzintensitäten von 2 % auftreten, wird in z-Richtung nur ein Wert von 1 % erreicht. Bei reduziertem Fahrzeugabstand nehmen die Turbulenzintensitäten jedoch deutlich zu. Bei 10 m Abstand steigt Tu_x dabei im Maximum auf bis zu 25 %, im Mittel auf 14 %. Tu_y erreicht maximal bis zu 19 % und der Durchschnittswert liegt bei 13 %. Tu_z weist geringere Turbulenzintensitäten auf, die im Mittel 10 % betragen. Sowohl die integralen Längenmaße als auch die Turbulenzintensitäten in x- und y-Richtung liegen im Mittel in ähnlichen Bereichen, allerdings ist die Streuung der Werte in x-Richtung bei geringeren Abständen größer.

Der Abstand zu einem vorausfahrenden Fahrzeug hat also einen signifikanten Einfluss auf die Turbulenzintensität und das integrale Längenmaß in der Anströmung des Versuchsfahrzeugs. Ein größerer Abstand verringert die Turbulenzintensität und erhöht das integrale Längenmaß. Die Schwankungen in der Strömung nehmen mit dem Abstand also ab, während die Strukturgrößen zunehmen.

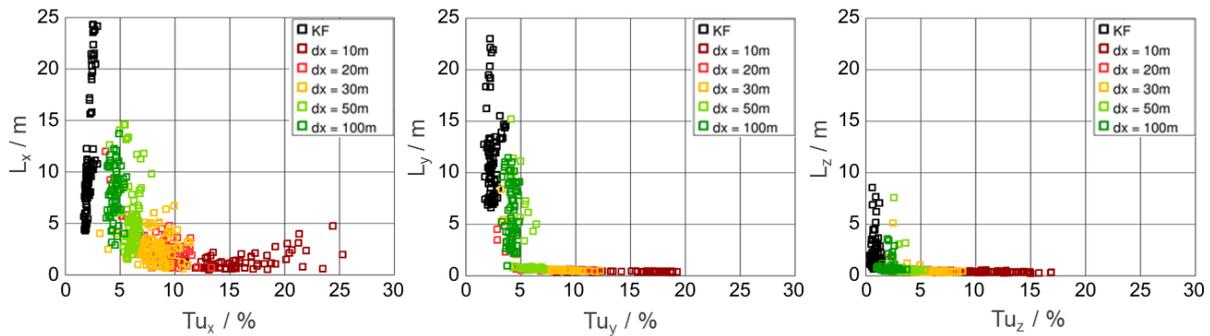


Abbildung 5-9: Verhältnis der Turbulenzintensitäten Tu zu den integralen Längenmaßen L für die verschiedenen Geschwindigkeitskomponenten für die Konstant- und Hinterherfahrt bei unterschiedlichen Abständen mit $v_F = 27,8$ m/s.

Verhältnisse der Turbulenzintensitäten

Zur Beschreibung der Hinterherfahrt ist nicht nur die Größe der Turbulenzintensität von Interesse, sondern auch, welchen Anteil die Schwankungen der einzelnen Geschwindigkeitskomponenten während des Fahrmanövers auf die Gesamtturbulenzintensität haben. Hierzu sollen zum einen das Verhältnis der Turbulenzanteile von Tu_x , Tu_y und Tu_z zur gesamten Turbulenzintensität Tu und zum anderen das Verhältnis der Anteile untereinander betrachtet werden.

Abbildung 5-10 (links) zeigt die Turbulenzintensitäten Tu_i für die Geschwindigkeitskomponenten der Hinterherfahrten aufgetragen über der Gesamtturbulenzintensität Tu . Die Werte stammen aus den Versuchsfahrten für Abstände zwischen 10 m und 100 m und von der Konstantfahrt. Die Turbulenzintensitäten für die unterschiedlichen Geschwindigkeitskomponenten sind in unterschiedlichen Farben dargestellt (rot: Tu_x , grün: Tu_y , blau: Tu_z). Für alle 3 Geschwindigkeitskomponenten ergibt sich ein linearer Anstieg mit der Gesamtturbulenzintensität. Die Komponenten der Turbulenzintensität in Fahrt- und Querrichtung steigen dabei ungefähr gleich stark mit der Gesamtturbulenzintensität an. Der Anstieg der Turbulenzintensität Tu_z mit der Gesamtturbulenzintensität gegenüber den anderen Turbulenzkomponenten ist geringer. Abbildung 5-10 (rechts) zeigt das Verhältnis der Turbulenzintensitäten für die Geschwindigkeitskomponenten (rot: x-Richtung, grün: y-Richtung, blau: z-Richtung) zur Turbulenzintensität Tu_x in Fahrtrichtung für die unterschiedlichen Fahrzeugabstände (Markierungen) und die Konstantfahrt (durchgezogene Linien). Zusätzlich sind die Verhältnisse der Turbulenzintensitäten für die Messungen im Straßenverkehr von Wordley [10] (gestrichelte Linien) und McAuliffe [12] (gepunktete Linien) aufgetragen. Die Farbgebung der Linien zu den Literaturwerten ist für die jeweiligen Komponenten Tu_i/Tu_x die gleiche wie für die Ergebnisse der Hinterherfahrten aus den Fahrversuchen. Das Verhältnis der Turbulenzintensitäten der Quergeschwindigkeit und der Geschwindigkeit in Fahrtrichtung ist nahezu gleich für alle Abstände der Hinterher- und Konstantfahrten und liegt bei 100 %. Die Turbulenzintensität Tu_z ist hingegen deutlich niedriger und fällt bei der Konstantfahrt mit größer werdendem Abstand von 75 % auf 40 % der Turbulenzintensität in Fahrtrichtung ab. Ein ähnlicher Trend tritt sowohl in Wordleys als auch McAuliffes Messergebnissen für die Straßenfahrten auf. Auch hier verhalten sich Tu_y und Tu_x nahezu identisch, während Tu_x deutlich niedrigere Werte aufweist. Dabei zeigt sich, dass die im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Versuche bei Abständen zwischen 30 m und 50 m qualitativ gut mit den Ergebnissen von Wordley übereinstimmen. Bei der Hinterherfahrt treten also bei bestimmten Abständen Verhältnisse der Turbulenzintensitäten der unterschiedlichen Geschwindigkeitskomponenten auf, wie sie auch bei Straßenfahrten üblich sind.

Die Turbulenzintensitäten der Geschwindigkeitskomponenten steigen alle linear mit der Gesamtturbulenz an. Die Turbulenzintensitäten in Fahrt- und Querrichtung sind nahezu gleich, während Tu_z abfällt. Die Geschwindigkeitsschwankungen in der Strömung entwickeln sich also unterschiedlich deutlich in

den Raumrichtungen. Die Ergebnisse für die Abstände von 30 m und 50 m weisen Ähnlichkeiten zu den Ergebnissen aus Straßenfahrten von Wordley auf. Im Gegensatz dazu werden die Tu_z -Werte von McAuliffe nicht erreicht. Das könnte an fehlenden anderen Verkehrsteilnehmern oder Straßenrandobjekten liegen. Jedoch weichen auch die Ergebnisse aus den Straßenfahrten von McAuliffe und Wordley deutlich voneinander ab. Eine mögliche Ursache könnte sein, dass die Tu_z äußerst empfindlich auf Änderungen in den Umgebungsbedingungen reagiert und im Straßenverkehr daher große Schwankungen auftreten können. Im Verhältnis zu den Turbulenzintensitäten Tu_x und Tu_y ist die Turbulenzintensität Tu_z deutlich geringer. Daher ist es sinnvoll, das Augenmerk zunächst auf die größeren Turbulenzintensitäten in Fahrt- und Querrichtung, Tu_x und Tu_y , zu richten.

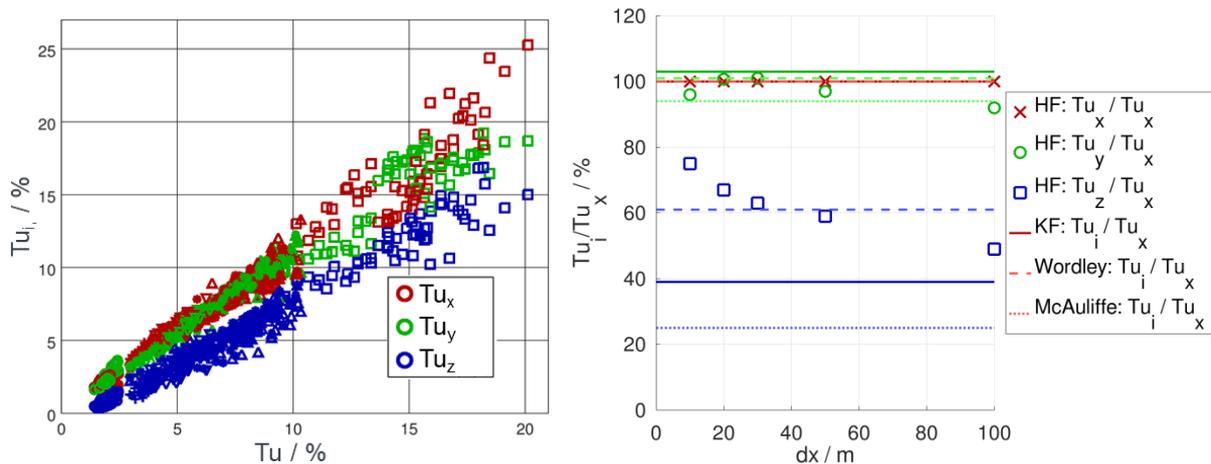


Abbildung 5-10: Links: Gegenüberstellung der Turbulenzintensitäten in die unterschiedlichen Raumrichtungen bezogen auf die Gesamtturbulenzintensität. Rechts: Turbulenzintensitäten in die unterschiedlichen Raumrichtungen im Verhältnis zur Turbulenzintensität in Fahrtrichtung bei unterschiedlichen Fahrzeugabständen. Zusätzlich rechts dargestellt: Verhältnisse der Turbulenzintensitäten aus den Straßenversuchen von Wordley [10] und McAuliffe [12].

Räumliche Verteilung der Turbulenzintensitäten

Die zuvor gezeigten Ergebnisse für die Turbulenzintensitäten berücksichtigen bisher nicht die Messposition am Array und treffen daher keine Aussage über die Verteilung der Turbulenzintensitäten vor dem Fahrzeug. Im Folgenden soll untersucht werden, wie sich die räumliche Verteilung der Turbulenzintensität in der Breite und Höhe vor dem Versuchsfahrzeug während der Hinterherfahrt verhält.

Abbildung 5-11 zeigt die Verteilung der Turbulenzintensitäten der Geschwindigkeitskomponenten (u: linke Abbildung, v: mittige Abbildung, w: rechte Abbildung) in Querrichtung für mehrere Positionen verteilt über die Breite des Arrays in einer Höhe von 0,5 m für unterschiedliche Fahrzeugabstände. Der oben beschriebene Trend, dass die Turbulenzintensitäten mit geringer werdendem Fahrzeugabstand steigen, bestätigt sich auch hier. Des Weiteren ändern sich die Turbulenzintensität in Querrichtung wenig. Mit abnehmendem Fahrzeugabstand ergibt sich jedoch eine leichte Asymmetrie, die insbesondere für die Turbulenzintensität Tu_x bei einem Abstand von 10 m deutlich wird. Hier zeigt sich eine Differenz in der Turbulenzintensität von bis zu 8 % zwischen der mittleren und den äußeren Sonden des Arrays. In y-Richtung variieren die Werte für alle Abstände mit nur geringen Differenzen von maximal 1,5 % über die Fahrzeugbreite. Für die Turbulenzintensität Tu_z liegt die Abweichung bei einem Abstand von 10 m bei bis zu 3 %, während bei größeren Abständen Abweichungen von maximal 1,5 % auftreten.

Die Ergebnisse für die Verteilung der Turbulenzintensitäten zeigen, dass für Abstände von mehr als 10 m – vereinfacht ausgedrückt – eine nahezu konstante Verteilung über die Fahrzeugbreite angenom-

men werden kann. Für den Abstand von 10 m gilt diese Vereinfachung allerdings nicht mehr uneingeschränkt, da es hier, insbesondere für Tu_x zu Unterschieden von bis zu 5% zwischen der Position in der Mitte und an den Seiten kommen kann.

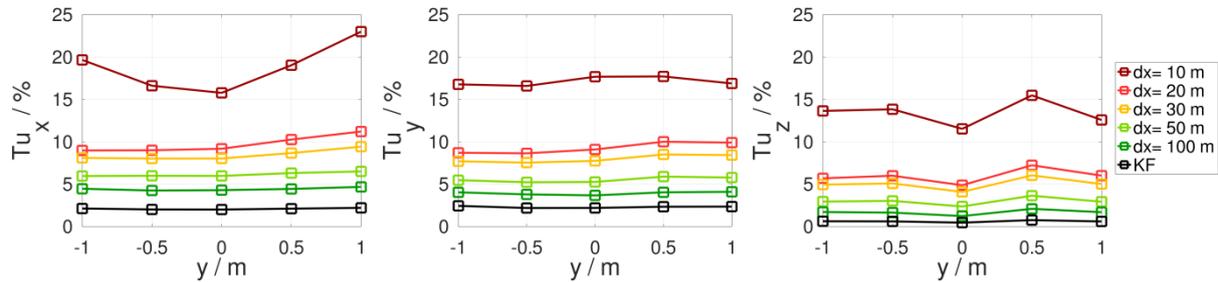


Abbildung 5-11: Verteilung der Turbulenzintensitäten an den Sonden des Arrays bei $z = 0,5$ m in den Raumrichtungen bei unterschiedlichen Abständen für die Hinterher- und die Konstantfahrt.

In Abbildung 5-12 sind die in der Mitte des Arrays ermittelten Turbulenzintensitäten über die Höhe aufgetragen (Tu_x : linke Abbildung, Tu_y : mittige Abbildung, Tu_z : rechte Abbildung). Es ist zu beachten, dass hier im Gegensatz zu Abbildung 5-13 die Achsen vertauscht wurden – die x-Achse gibt die jeweilige Turbulenzintensität an während die y-Achse die Höhe der Messposition widerspiegelt. Die Verteilung der Turbulenzintensität in Abhängigkeit von der Höhe für die unterschiedlichen Abstände dx zwischen den Fahrzeugen (Abbildung 5-12) verhalten ähnliches wie die Verteilungen in Querrichtung in Abbildung 5-11. Die Variation der Turbulenzintensitäten der u- und v-Komponenten liegt für jeden der Abstände bei unter 1 %. Eine Ausnahme ist auch hier wieder der Abstand 10 m, insbesondere für die Turbulenzintensität in Fahrtrichtung Tu_x , die in Bodennähe um 2 % leicht ansteigt. Für Tu_z nehmen die Turbulenzintensitäten insbesondere bei den mittleren Abständen von 20 m - 50 m um bis zu 2,5 % ab. Bemerkenswert ist schließlich noch, dass die Turbulenzintensitäten in Fahrt- und Querrichtung sich auch in vertikaler Richtung nur um maximal $\Delta Tu_{x,y} = 1$ % unterscheiden.

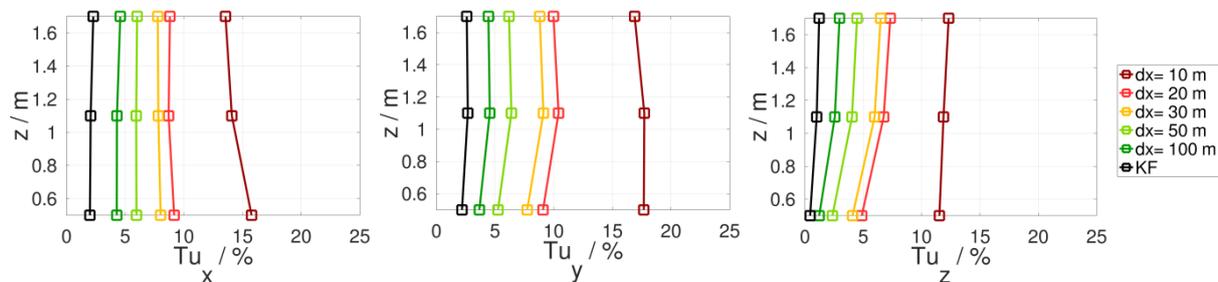


Abbildung 5-12: Verteilung der Turbulenzintensitäten Tu_x (links), Tu_y (mittig) und Tu_z (rechts) in vertikaler z -Richtung an den Sonden des Arrays bei $y = 0$ m für unterschiedliche Fahrabstände bei den Hinterher- und Konstantfahrten.

Mittlere Anströmgeschwindigkeiten

Im Folgenden soll der Einfluss des Nachlaufs des vorherfahrenden Fahrzeugs auf die mittlere Anströmgeschwindigkeit am Versuchsfahrzeug untersucht werden.

In Abbildung 5-13 ist die auf die Fahrgeschwindigkeit bezogene mittlere Anströmgeschwindigkeit über dem Fahrzeugabstand dx aufgetragen. Zusätzlich sind die Geschwindigkeitsverhältnisse Konstantfahrt (gestrichelte, schwarze Linie) und Straßenfahrt (graue Strich-Punkt-Linie) eingezeichnet. Die Konstantfahrt weist ein Geschwindigkeitsverhältnis von nahezu 1 auf und die Straßenfahrt ein Verhältnis von 0,86. Bei der Hinterherfahrt nimmt die Anströmgeschwindigkeit gegenüber der Fahrgeschwindigkeit mit geringer werdenden Fahrzeugabständen kontinuierlich von 97 % bei 100 m Abstand auf 68 % bei

10 m Abstand ab. Ursache hierfür ist vermutlich der Nachlauf des vorherfahrenden Fahrzeugs. Das Fluid im Nachlauf des vorherfahrenden Fahrzeugs wird in dessen Fahrtrichtung beschleunigt wodurch die Relativgeschwindigkeit zwischen dem Fluid und dem Versuchsfahrzeug sinkt. Bei größer werdenden Abständen führen die Durchmischung des Nachlaufs mit dem stehenden, äußeren Fluid und die Reibungsverluste zu einer verringerten Geschwindigkeit des Fluids im Nachlauf in Fahrtrichtung. Ein Verkehrsteilnehmer hat also auf Grund des Nachlaufgebiets seines Fahrzeugs einen deutlichen Einfluss auf die Anströmung des hinterherfahrenden Fahrzeugs. Die dadurch verringerte Anströmgeschwindigkeit reduziert die Widerstandskraft deutlich, da die Widerstandskraft quadratisch von der Anströmgeschwindigkeit abhängt. Der Vergleich mit den Ergebnissen der Straßenfahrt (siehe auch Abbildung 5-3) zeigt, dass der dort auftretende Geschwindigkeitsverlust bei etwa 14 % liegt. Dies liegt im Bereich von 30 m - 50 m Abstand bei der Hinterherfahrt, der im Straßenverkehr in diesem Geschwindigkeitsbereich häufig vorkommt.

Die Anströmgeschwindigkeit wird also durch das vorausfahrende Fahrzeug beeinflusst und verringert sich mit kleineren Abständen zwischen den Fahrzeugen.

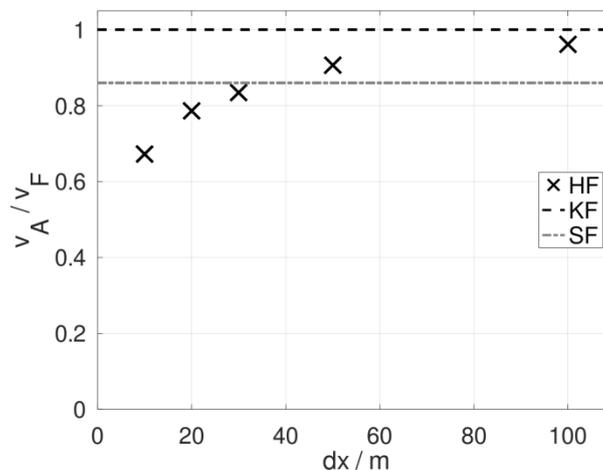


Abbildung 5-13: Übersicht der Veränderung des Geschwindigkeitsverhältnisses zwischen der Fahrge- schwindigkeit v_F und der Anströmgeschwindigkeit v_A sowie der Standardabweichung von $\sigma(v_A)$ für unterschiedliche Abstände bei der Hinterher- und Konstantfahrt mit 27,8 m/s.

Instationarität der Anströmgeschwindigkeiten

Zum tiefergehenden Verständnis der Strömungsverhältnisse ist – neben der Betrachtung der statischen Eigenschaften – eine Analyse der instationären Vorgänge in der Anströmung nötig. Daher wird im Folgenden der zeitliche Verlauf der Geschwindigkeiten für die unterschiedlichen Abstände der Hinterherfahrt und die Konstantfahrt näher betrachtet.

Dazu sind in Abbildung 5-14a (links) die mit den auf der Höhe $z = 0,5$ m horizontal angeordneten Sonden des Array bei der Konstantfahrt gemessenen zeitlichen Verläufe der Geschwindigkeitskomponenten (u: oben, v: mittig, w: unten) dargestellt. Die Farben der Geschwindigkeitskurven entsprechen den Positionen der rechts dargestellten Sonden in derselben Farbe.

Die zeitlichen Verläufe der Geschwindigkeitskomponenten in Abbildung 5-14a zeigen eine konstante Anströmgeschwindigkeit mit lediglich geringen Fluktuationen von ca. 0,5 m/s über die Zeit in alle Raumrichtungen.

Die zeitlichen Verläufe für die Geschwindigkeitskomponenten bei einer Hinterherfahrt hinter einem Transporter mit 50 m Abstand sind in Abbildung 5-14b dargestellt. Dieser Abstand repräsentiert einen

im Straßenverkehr häufig gefundenen Fahrzeugabstand wider. Die Anströmgeschwindigkeit ist im Vergleich zur Anströmgeschwindigkeit bei der Konstantfahrt und zur Fahrzeuggeschwindigkeit $v_F = 27,8$ m/s reduziert. Das ist auf das Nachlaufgebiet des vorausfahrenden Fahrzeugs zurückzuführen. Auch die Fluktuationen erhöhen sich auf Grund der Fahrt im Nachlaufgebiet in alle Raumrichtungen auf bis zu 5 m/s. Insbesondere für die Geschwindigkeitskomponente v , aber auch für u , lassen sich dabei Periodizitäten in der Fluktuation erkennen. Dies deutet auf regelmäßig auftretende Strukturen in der Nachlaufströmung hin.

Die Plots in Abbildung 5-14c zeigen die zeitlichen Verläufe der Geschwindigkeitskomponenten für den dichtesten Abstand von 10 m. Der Einfluss des Nachlaufes wird hier noch deutlicher. Die Geschwindigkeitsfluktuationen sind abermals erhöht und liegen in einer Spanne von bis zu 15 m/s für die Komponenten u und v . Auch hier ist eine Periodizität in den Schwankungen festzustellen. Außerdem ist die Anströmgeschwindigkeit in Fahrtrichtung deutlich geringer und liegt jetzt bei ca. 16 m/s.

Der Einfluss eines vorausfahrenden Fahrzeugs wirkt sich also deutlich auf die Strömungsgeschwindigkeiten aus. Geringere Abstände reduzieren die Strömungsgeschwindigkeit in Fahrtrichtung und erhöhen die Schwankungen. Der Verlauf der Schwankungen ist dabei nicht nur rein willkürlich, sondern deutet periodische Strukturen für die Fahrt im Nachlauf an.

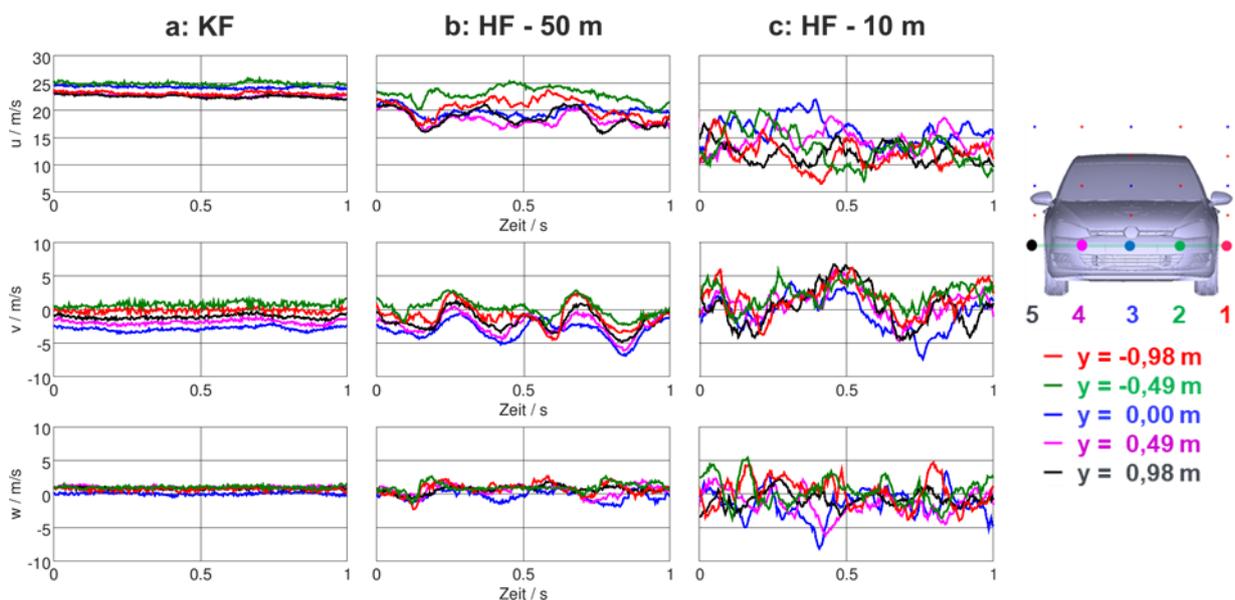


Abbildung 5-14: Zeitliche Verläufe der Geschwindigkeitskomponenten am Fahrzeugarray in $z = 0,5$ m für die Konstant- (oben) sowie die Hinterherfahrten bei 50 m (mittig) und 10 m (unten) Abstand mit 27,8 m/s.

Um eine bessere Vorstellung der räumlichen Verteilung der Geschwindigkeitsschwankungen zu bekommen, wird im Folgenden die Schwankung der Quergeschwindigkeit v' über die Breite des Fahrzeugs betrachtet. Hierzu ist die Quergeschwindigkeitsschwankung v' in Abbildung 5-15 über die Breite y (x-Achsen der Abbildung) und über die Zeit t (y-Achsen der Abbildung) in Form eines Konturplots aufgetragen. Die Farbskala wurde so gewählt, dass Blautöne negative Abweichungen vom zeitlichen Mittelwert der jeweiligen Sonde darstellen, Rottöne positive Abweichungen und Weißtöne nahezu keine Abweichung vom Mittelwert bedeuten. Die Werte zwischen den Sonden wurden linear interpoliert. Die einzelnen Konturplots stellen von links nach rechts die Ergebnisse für die Konstantfahrt (links) und die Hinterherfahrten – mit den Abständen 100 m, 50 m, 30 m, 20 m und 10 m – dar.

Bei der Konstantfahrt zeigt sich eine gleichmäßige Verteilung der Geschwindigkeit über die Fahrzeugbreite mit sehr geringer zeitlicher Fluktuation von weniger als $\pm 0,5$ m/s. Im Nachlauf eines vorausfahrenden Fahrzeugs werden die Geschwindigkeitsschwankungen gleichmäßig über die gesamte Fahrzeugbreite verteilt, fluktuieren jedoch periodisch über die Zeit um 0 m/s. Die Amplituden der Schwankungen nehmen dabei mit geringer werdendem Fahrzeugabstand zu. Beim größten Abstand von 100 m beträgt die Fluktuation $\pm 1,5$ m/s, beim kleinsten Abstand von 10 m teilweise über ± 6 m/s.

Die Anströmung des Fahrzeugs ist also stark von periodisch auftretenden Strukturen im Nachlauf des vorherfahrenden Fahrzeugs und dessen Abstand geprägt. Die Geschwindigkeitsfelder zeigen dabei, dass die Schwankungen der Geschwindigkeiten primär über die Zeit stattfinden, in Querrichtung die Geschwindigkeitsschwankungen jedoch zum selben Zeitpunkt nur geringfügig variieren.

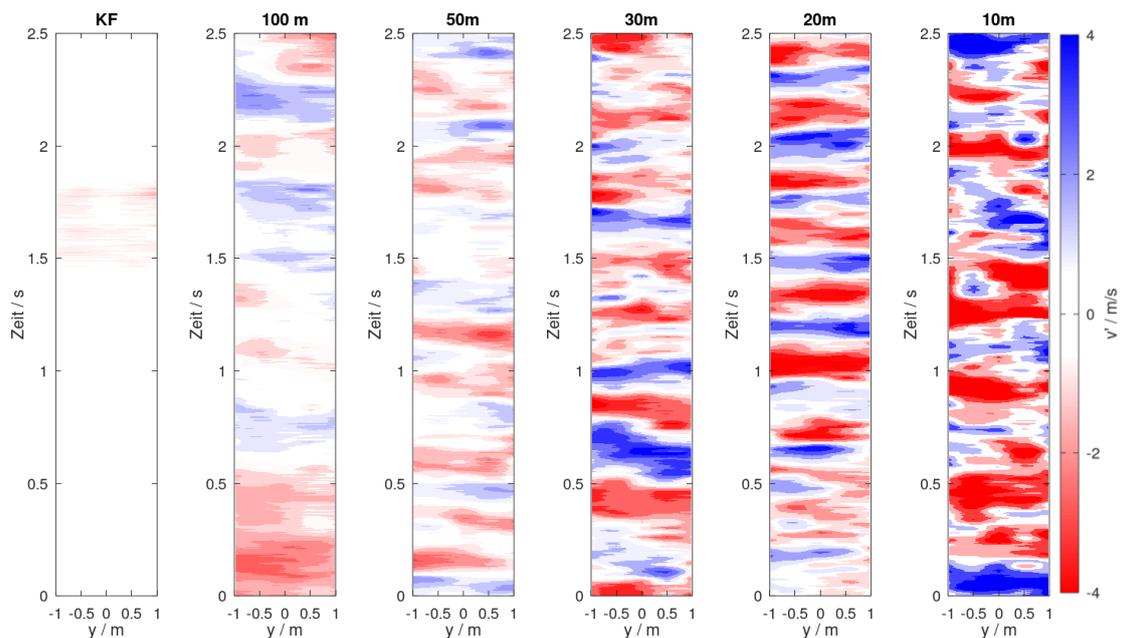


Abbildung 5-15: Instationäres Geschwindigkeitsfeld der Schwankungen v' an der unteren Sondenreihe des Fahrzeugarrays. Für jede Sondenposition sind die Abweichungen in der Quergeschwindigkeit vom zeitlichen Mittelwert an der jeweiligen Sonde dargestellt. Die Zwischenbereiche wurden linear interpoliert. Von links nach rechts sind zunächst die Konstant- und dann die Hinterherfahrt mit abnehmenden Abständen (von 100 m - 10 m) bei $v_F = 100$ km/h dargestellt.

Geschwindigkeitsspektrum der Anströmung

Die in Abbildung 5-15 gezeigten Strukturen weisen auf periodische Schwankungen hin. Um zu überprüfen, ob energiereiche, periodische Strukturen existieren und um diese gegebenenfalls quantifizieren zu können, werden die Spektren der Geschwindigkeitsschwankungen ausgewertet.

Abbildung 5-16 zeigt die Spektren der Schwankungen der Geschwindigkeitskomponenten u' (links), v' (mittig) und w' (rechts) für Frequenzen von 0,5 Hz - 30 Hz bei unterschiedlichen Fahrzeugabständen. Für jeden Abstand wurden 8 Versuchsfahrten durchgeführt. Für jede durchgeführte Versuchsfahrt wurde ein Zeitabschnitt von 100 s gewählt, um mit der Methode von Welch mit Fensterbreiten von 4 s und 50 % Überlappung der Fenster das Spektrum zu bestimmen. Aus den Spektren von den Messungen mit denselben Fahrzeugabständen wurde dann ein mittleres Spektrum für den jeweiligen Abstand berechnet. Die Kurvenverläufe zeigen die Spektren für die Konstantfahrt (schwarze Linie) und die Hinterherfahrten (farbige Linien) mit unterschiedlichen Abständen bei $v_F = 27,8$ m/s. Alle gemessenen Spektren sind

breitbandig und die Energie nimmt mit zunehmendem Fahrzeugabstand ab. Die niedrigsten Werte ergeben sich für die Konstantfahrt. Des Weiteren ist mit zunehmenden Frequenzen für die Konstantfahrt eine kontinuierliche Abnahme des Energieinhalts für alle Geschwindigkeitskomponenten erkennbar. Bei den Hinterherfahrten weisen die Spektren hingegen für u und w ein Plateau bis ca. 3 Hz auf und fallen dann mit zunehmender Frequenz ab. In der Querkomponente v tritt zusätzlich ein Maximum bei ca. 2,5 Hz auf. Dieses bestätigt die statistische Relevanz der Vermutung, dass es im Nachlauf des Transporters periodische Strukturen gibt, wie sie sich in Abbildung 5-14b für den Zeitverlauf von v andeuten. Schätzt man die Nachlauffrequenz mittels der technisch üblichen Strouhal-Zahl (Definition, siehe Formel Gleichung (13)) $St = 0,2$ ab, so ergibt sich für die Fahrzeugbreite des Transporters von 2,21 m bei einer Geschwindigkeit 27,8 m/s ebenfalls eine Frequenz von 2,5 Hz.

Die Ergebnisse zeigen, dass bei den Versuchen ein breitbandiges Spektrum auftritt, das mit der Frequenz abfällt. Es ist jedoch zu beobachten, dass das vorherfahrende Fahrzeug einen Einfluss auf die Anströmung am Versuchsfahrzeug hat. Im Fall des vorherfahrenden Transporters treten in der Nachlaufströmung – insbesondere in Querrichtung – niederfrequente, periodische Strukturen im Bereich von 2,5 Hz auf. Der Energiegehalt der Strukturen nimmt mit abnehmendem Fahrzeugabstand zu.

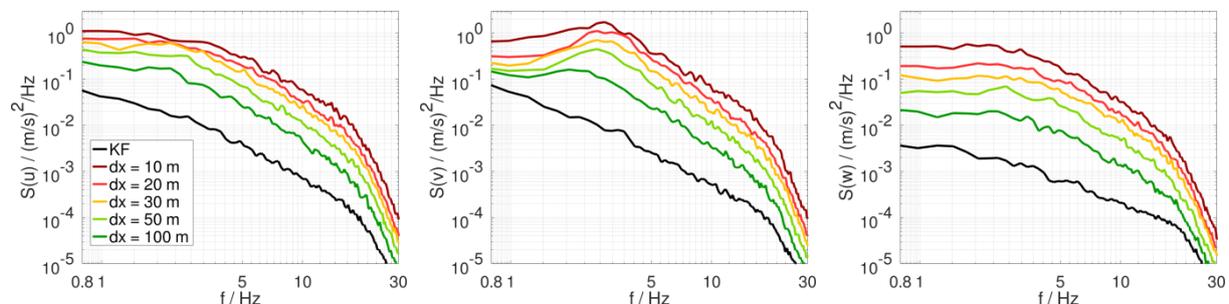


Abbildung 5-16: Spektren der Geschwindigkeitskomponenten (von links nach rechts: u , v , w) für die Konstant- und Hinterherfahrten für die mittlere Sonde in 0,5 m Höhe bei einer Geschwindigkeit von 27,8 m/s.

Korrelationsfunktionen der Geschwindigkeiten

Die in Abbildung 25 dargestellten integralen Längenskalen wurden mittels Autokorrelationen der Zeitsignale ermittelt. Die integralen Längenskalen sind ein Maß für die Ausbreitung von korrelierenden Strukturen in Fahrtrichtung für die unterschiedlichen Geschwindigkeitskomponenten. Die Schwankungen der Quergeschwindigkeit v' (Abbildung 5-15) zeigen qualitativ, dass auch in Querrichtung Strukturen vorhanden sind, die von dem integralen Längenmaß nicht erfasst werden, aber für die Untersuchungen relevant sein können. Dies gilt insbesondere für Strukturgrößen im Bereich der Fahrzeugmaße. Bei sehr großen Strukturen kann man von sich sehr langsam verändernden Strukturen ausgehen, die geringe Unterschiede in der Anströmung des Fahrzeugs verursachen. Sehr kleine Strukturen, wie beispielsweise ein Rauschen, gleichen sich über die Fahrzeugoberfläche im Mittel vermutlich aus und besitzen somit keine Relevanz in Hinblick auf im Windkanal nachzubildende Strukturen. Strukturen – die im Bereich der Fahrzeugmaße liegen – könnten jedoch für die Windkanal-untersuchungen relevant sein. Um festzustellen, ob in Querrichtung Strukturen von relevanter Größe für die unterschiedlichen Geschwindigkeitskomponenten auftreten, sollen die Strukturgrößen abgeschätzt werden. Die Strukturgrößen werden mittels Korrelationen der – an den über die Breite des Arrays verteilten Sonden gemessenen – Geschwindigkeitskomponenten ermittelt.

Um die horizontale Korrelation der Strukturen über die Fahrzeugbreite quantifizieren zu können, werden im Folgenden die Zeitsignale der Geschwindigkeitsschwankungen u' , v' und w' der einzelnen Sonden

mit der Referenzsonde 1 (bei $y = -0,98$ m) korreliert werden. Hierzu wird Gleichung (11) für die normierte Kreuzkorrelation R wie folgt für die Geschwindigkeitskomponente u angewendet:

$$R_u(\tau) = \frac{\sum_{t=-0,5s}^{0,5s} u_{\text{Sonde } 1}(t) \cdot u_{\text{Sonde } i}(t + \tau)}{\sqrt{\sum_{t=-0,5s}^{0,5s} (u_{\text{Sonde } 1}(t))^2} \cdot \sqrt{\sum_{t=-0,5s}^{0,5s} (u_{\text{Sonde } i}(t))^2}} \quad \text{Gleichung (18)}$$

Eine detaillierte Herleitung des normierten Korrelationskoeffizienten ist in Kapitel 2.3.3 beschrieben. Das Signal x_1 ist im folgenden Fall das Referenzsignal $u_{\text{Sonde } 1}$ der Sonde 1 für die Geschwindigkeitskomponente u . Das Signal x_2 ist die Geschwindigkeitskomponente $u_{\text{Sonde } i}$ an der zu korrelierenden Sonde gemessene Geschwindigkeitsfluktuation. Analog zur Geschwindigkeit u werden auch die Korrelationen der Geschwindigkeitskomponenten v und w über Gleichung (18) ermittelt. τ ist der Zeitversatz zwischen den Sonden. Der Zeitversatz wird für den Fall einbezogen, dass die in der Strömung konvektierenden Strukturen die Signale an den Sonden zeitversetzt verändern. Im Nachfolgende wird die Betrachtung für einen Zeitversatz von $0,5 s < \tau < 0,5s$ durchgeführt. Aufgrund der Länge der Zeitsignale könnten auch deutlich Zeitintervalle analysiert werden, die jedoch keine physikalisch relevante Information enthalten. Anhand der Korrelation der Signale lässt sich eine Aussage machen, wie ähnlich der Verlauf der Signale ist und somit, wie ähnlich die Strukturen sind. Große Korrelationskoeffizienten für weiter auseinanderliegende Sonden sprechen für großskalige Strukturen in Querrichtung oder für ähnliche kleinskalige Strukturen. Jedoch lässt die in Abbildung 5-15 dargestellte Entwicklung vermuten, dass es sich um in der Breite großskalige Strukturen handelt. Mit Hilfe der Korrelation lassen sich die Beobachtungen – dass sich Strukturen über die gesamte Fahrzeugbreite erstrecken können – außerdem quantitativ für die Statistik über die Gesamtdauer der Signale an den Sonden beschreiben.

Hierfür ist in Abbildung 5-17 der normierte Korrelationskoeffizient über den Zeitversatz τ dargestellt. Die obere Reihe zeigt die Ergebnisse der Korrelationen für die Geschwindigkeitsschwankung u' . In der mittleren Reihe wird v' dargestellt und in der unteren Reihe w' . Die Schwankungen der Geschwindigkeiten werden berechnet, indem die zeitlich gemittelten Geschwindigkeitskomponenten an den jeweiligen Sonden vom Zeitsignal abgezogen werden. Die Spalten zeigen die Korrelationen für die unterschiedlichen Fahrzeugabstände. Links sind die Ergebnisse für die Konstantfahrt gezeigt, in der Mitte sind die Ergebnisse für einen Abstand von 50 m aufgeführt und rechts die Ergebnisse für einen Abstand von 10 m. Als Referenzsonde wurde Sonde 1 links außen am Array bei $y = 0,98$ m in einer Höhe von $z = 0,5$ m verwendet. Die Sondennummern steigen mit der y -Position der Sonde. Mit zunehmender Sondennummer wandert die Sondenposition jeweils um $+0,49$ m weiter nach rechts und der Abstand zur Referenzsonde vergrößert sich auf bis zu 1,96 m. Die Ergebnisse für die Korrelationen der jeweiligen Sonde mit der Referenzsonde sind in unterschiedlichen Farben dargestellt. Eine Übersicht über die Messposition der einzelnen Sonden, deren Abstand zur Referenzsonde 1 und die zugehörige Farbe in den Grafen von Abbildung 5-17 ist in Tabelle 5-4 zusammengefasst. Bei den dargestellten Ergebnissen handelt es sich um Korrelationen, die über die Ergebnisse von je 8 Versuchsfahrten desselben Abstandes mit je 100 s Signallänge gemittelt wurden.

Tabelle 5-4: Sondenpositionen und Abstände zur Referenzsonde am Fahrzeugarray in einer Höhe von $z = 0,5$ m sowie die Farben der Verläufe in Abbildung 5-17 für die Korrelation zwischen den Signalen an der jeweiligen Sondenposition mit den Signalen der Referenzsonde.

Sonde	1 (Referenz)	2	3	4	5
y-Position / m	-0,98	-0,49	0	0,49	0,98
Abstand Δy zur Referenzsonde / m	0,00	0,49	0,98	1,47	1,96
Farbe	Rot	Grün	Blau	Pink	Schwarz

Für die Konstantfahrt ergeben sich sowohl für u' als auch für v' Korrelationskoeffizienten von über 0,75 an allen Sondenpositionen im Bereich um $\tau = 0$ s. Das bedeutet, dass die Signale für u' und v' über die Breite zum selben Zeitpunkt eine sehr große Ähnlichkeit aufweisen. Zusammen mit dem Ergebnis, dass die Geschwindigkeit in der Querrichtung kaum variiert (siehe Abbildung 5-15), spricht das für eine – im Vergleich zur Fahrzeugbreite – großskalige Struktur in der Strömung in Längs- und Querrichtung, die sich in Querrichtung nur wenig verändert. Eine solch große Struktur erlaubt bei der Simulation der Konstantfahrt die Vereinfachung, dass die Strömungsgeschwindigkeiten in Querrichtung konstant sind. Die Lage der maximalen Korrelationskoeffizienten bei $\tau \approx 0$ s zeigt, dass an unterschiedlichen – über die gesamte Fahrzeugbreite verteilten Positionen – die Strukturen nahezu gleichzeitig auf das Fahrzeug auftreffen. Die Korrelationen für w' zeigen ein schnelles Abklingen der Korrelationskoeffizienten sowohl mit größer werdenden Zeitversätzen als auch mit größer werdenden Sondenabständen. Ab einem Sondenabstand von 0,98 m (entspricht etwa der halben Fahrzeugbreite) treten maximale Korrelationskoeffizienten von 0,3 auf. Solche niedrigen Werte sprechen für eine sehr schwache oder nicht vorhandene Korrelation des Signals mit dem Signal der Referenzsonde. Die Strukturen in w' sind also kleiner als die halbe Fahrzeugbreite.

Auch bei einem Fahrzeugabstand von 50 m liegen die maximalen Korrelationskoeffizienten im Bereich um $\tau = 0$ s. Die Strukturen treffen also nahezu zeitgleich über die gesamte Fahrzeugbreite auf das Fahrzeug auf. Die maximalen Korrelationen der Messsignale an den Sonden mit dem Referenzsignal zeigen, dass bis zur Fahrzeugmitte Korrelationskoeffizienten über 0,5 auftreten. Für diese Geschwindigkeitskomponente sind also relevante Strukturen von einer Größe, die etwa der halben Fahrzeugbreite entspricht, vorhanden. Für die Korrelationen der Geschwindigkeitskomponente v' sind die Ergebnisse ähnlich wie für die Korrelationen von u' . Es gibt jedoch 2 deutliche Unterschiede: Einerseits ist die Korrelation über die Sonden größer. Die Struktur ist Querrichtung für v' also größer als für u' . Dies deckt sich mit Abbildung 5-15, die nur kleine Unterschiede der Geschwindigkeitsschwankungen v' über die Breite des Fahrzeugs zeigt. Andererseits ist für die Quergeschwindigkeit ansatzweise das periodische Verhalten erkennbar. So schwingt auch der Korrelationskoeffizient über τ um 0. Die Geschwindigkeitskomponente w' weist eine ähnliche Korrelation wie für die Konstantfahrt auf. Die Korrelation über die Sonden ist jedoch geringer, die Strukturen sind also deutlich kleiner als die Fahrzeugbreite und haben somit vermutlich keine Relevanz, weil sich die vielen kleinen Strukturen statistisch über die Fahrzeugbreite ausgleichen.

Für den Fahrzeugabstand von 10 m treten für u' weder große Korrelationen über τ , noch über die unterschiedlichen Sonden bei $\tau = 0$ s auf. Es treten also kleine Strukturen in Querrichtung für u' im Vergleich zur Fahrzeugbreite auf, die von höchstens 2 benachbarten Sonden aufgelöst werden können. Für die Querkomponente der Strömung ist jedoch zum Zeitpunkt $\tau = 0$ s noch immer eine gute Korrelation über die Fahrzeugbreite zu erkennen. Die maximalen Korrelationskoeffizienten klingen zwar schneller ab als bei der Konstantfahrt oder der Hinterherfahrt bei 50 m, sind jedoch noch über einen großen Teil der Fahrzeugbreite vorhanden. Die Strukturen breiten sich also weniger weit aus als bei 50 m Abstand. Die Korrelationskoeffizienten für w' weisen einen ähnlichen Verlauf wie bei 50 m Abstand auf. Die Strukturen scheinen auch hier auf Grund ihrer Größe nur eine untergeordnete Relevanz zu haben.

Mit den Korrelationen kann gezeigt werden, dass Strömungsstrukturen für u' und v' auftreten, die in ihrer Größe in Querrichtung im Bereich der Fahrzeugbreite liegen. Die Strukturen treten nahezu unverzögert über die gesamte Fahrzeugbreite auf. Bei der Hinterherfahrt treten Strömungsstrukturen auf, die sich über die gesamte Fahrzeugbreite erstrecken. Es handelt sich also um Strukturgrößen, die in einer relevanten Größenordnung liegen. Im Vergleich hierzu wurden bei der Konstantfahrt Strömungsstrukturen gemessen, deren Abmessungen die Fahrzeugmaße um ein Vielfaches übertreffen. Im Gegensatz dazu ist die Vertikalkomponente w' nur über sehr kleine Strukturen korreliert, die vermutlich keine Relevanz für die Untersuchungen des Widerstandsbeiwerts haben.

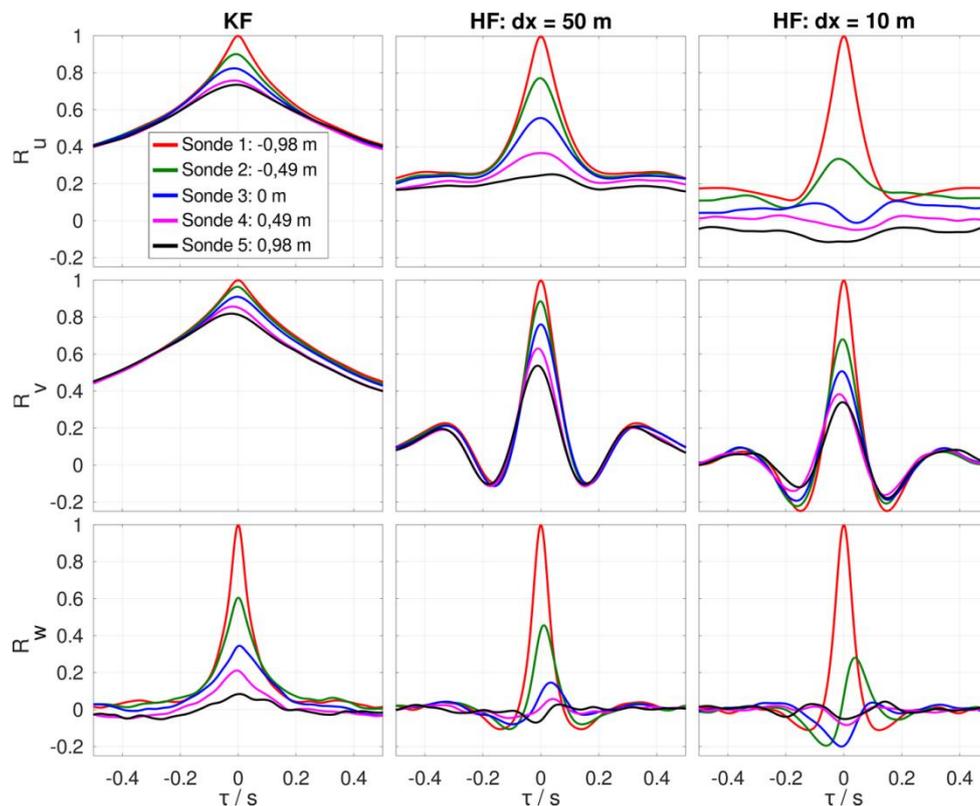


Abbildung 5-17: Korrelationskoeffizienten der Zeitsignale für die Geschwindigkeitskomponenten am 2D-Array ($z = 0,5$ m) in Relation zur Referenzsonde 1 (links). Nummerierung aufsteigend von links nach rechts. Spalten: KF, HF 50 m, HF 10 m. Reihen: Geschwindigkeitskomponenten u' , v' , w' .

5.2.2 Oberflächendrücke

Der Einfluss der instationären Anströmung auf das Fahrzeug wird im Folgenden zunächst anhand der mittleren Drücke, der Standardabweichung der Druckschwankungen sowie anhand der zeitlichen Verläufe der Drücke beurteilt. Die Ergebnisse für die Drücke bilden später außerdem die Grundlage zur Validierung der Windkanalergebnisse, da im Fahrversuch die auftretenden aerodynamischen Kräfte nicht direkt gemessen werden können.

Neben den Anströmbedingungen ist die Druckverteilung an der Fahrzeugoberfläche von großem Interesse. Die Druckverteilung gibt Aufschluss über die Auswirkung der veränderten Anströmung auf die unterschiedlichen Bereiche des Fahrzeugs und darüber, welche Bereiche besonders empfindlich auf eine veränderte Anströmung reagieren könnten.

Abbildung 5-18 (links) zeigt die Druckbeiwerte c_p (durchgezogene Linien mit vollen Kreisen) und deren Schwankungen $c_{p,rms}$ (gestrichelte Linien mit Kreisringen) über x . Die Druckbeiwerte sind an der linken

Achse angegeben, die Schwankungen an der rechten Achse. Die Drücke wurden an den Druckbohrungen entlang der Motohaube und am Dach entlang der Mitte $y = 0$ m gemessen. Die Farben der Linien geben den Abstand zwischen den Fahrzeugen während der Hinterherfahrten an. In Schwarz sind die Ergebnisse für die Konstantfahrt dargestellt, in Dunkelgrün sind die Ergebnisse für die Hinterherfahrt bei 100 m Abstand angegeben. Die Ergebnisse bei 50 m Abstand sind in Hellgrün dargestellt, für 30 m Abstand in Gelb, und für 20 m Abstand in Rot. Die Drücke bei einem Abstand von 10 m sind in Dunkelrot eingezeichnet. Der Referenzdruck ist analog zu Abbildung 4-3 gewählt. Zur Berechnung des dynamischen Drucks für c_p wurde die mittlere Anströmgeschwindigkeit v_A verwendet. Diese berücksichtigt die verringerte Anströmgeschwindigkeit im Nachlauf des vorherfahrenden Fahrzeugs.

Abbildung 5-18 (rechts) stellt die Druckbeiwerte und Druckschwankungen über der Höhe z am Heck des Fahrzeugs dar. Die Höhe ist an der y -Achse der Abbildung angegeben. Die Druckbeiwerte sind an der oberen x -Achse und die Druckschwankungen an der unteren x -Achse angegeben. Die Symbole und Farbgebung entsprechen Abbildung 5-18 (links). Die Messwerte stammen von den Druckbohrungen entlang des Hecks bei $y = 0$ m.

Am Fahrzeugheck steigen die Beiwerte mit der Fahrzeughöhe für alle Fahrzeugabstände an. Mit kleiner werdendem Fahrzeugabstand nehmen die absoluten Werte des Druckbeiwerts jedoch ab. Im Gegensatz dazu nimmt die Druckschwankung für kleiner werdende Fahrzeugabstände zu. Die Schwankung des Drucks nimmt mit der Höhe z ab.

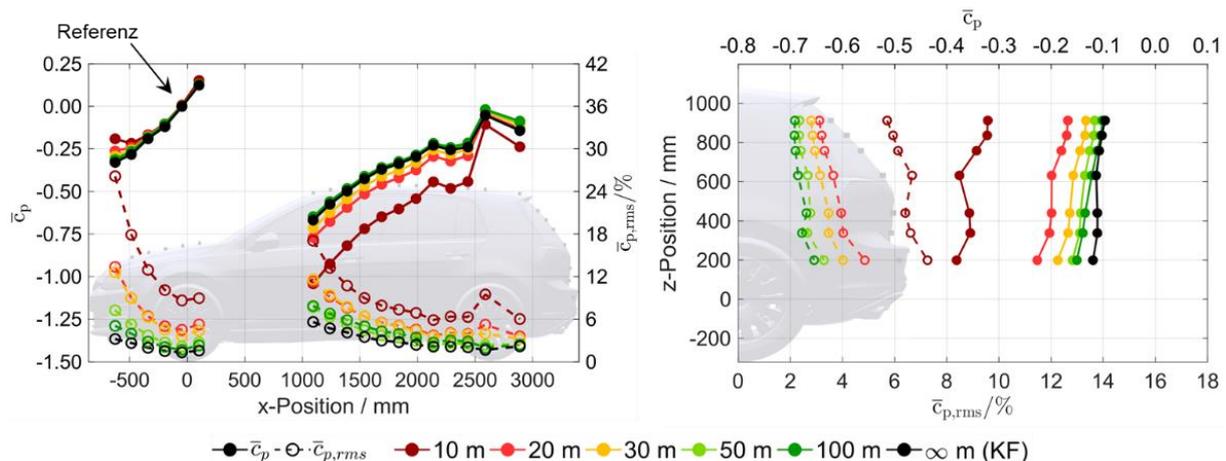


Abbildung 5-18: Verteilung der Druckbeiwerte und ihrer Schwankung für die Konstant- und Hinterherfahrt entlang der Fahrzeugmitte (links) sowie entlang der Motorhaube und des Dachs und am Heck (rechts) bei $v_F = 27,8$ m/s.

Abbildung 5-19 zeigt die Druckbeiwerte und deren Schwankungen über die Fahrzeugbreite y . Die Druckbohrungen befinden sich sowohl für den Frontbereich (linke Abbildung) als auch für den Heckbereich (rechts) entlang der Stoßstange. Die Ergebnisse stammen aus der Konstantfahrt und den Hinterherfahrten bei 10 m - 100 m Abstand. Die Symbole und die Farbgebung entsprechen Abbildung 5-18.

Während die Druckbeiwerte über die Breite der Front (linke Abbildung) für abnehmende Fahrzeugabstände nur geringfügig ansteigen, zeigen die Druckschwankungen eine deutlichere Abhängigkeit vom Fahrzeugabstand. Insgesamt steigen die Schwankungswerte für kleiner werdende Fahrzeugabstände an, wobei die größten Schwankungswerte von bis zu 46 % bei ca. $y = \pm 600$ mm gemessen werden. Für den Bereich $-500 \text{ mm} < y < 500 \text{ mm}$ ändern sich die Schwankungen für den jeweiligen Fahrzeugabstand wenig. Dies widerspricht der Messungen der Schwankungswerte bei der Straßenfahrt, für die sich in der Fahrzeugmitte ($y = 0$ m) ein Maximum einstellt (siehe Abbildung 5-8). Am Fahrzeugheck (rechts) nimmt – analog zu Abbildung 5-18 (rechts) – der Druckbeiwert mit kleineren Fahrzeugabständen ab. Die Drücke verringern sich allerdings nur geringfügig. Eine Ausnahme bildet hier der Fahrzeugabstand

von 10 m. Hier fällt der Druckbeiwert gegenüber den anderen Abständen deutlich ab. Die Druckschwankungen nehmen am Rand – vermutlich auf Grund der lokalen Ablösungen, die durch die Fahrzeuggeometrie bedingt werden, – für alle Abstände zu. Die Druckschwankungen über die Fahrzeugbreite nehmen ebenfalls durchgängig mit kleiner werdenden Fahrzeugabständen zu. Insbesondere bei einem Abstand von 10 m nehmen die Schwankungen des Drucks gegenüber den Druckschwankungen bei anderen Abständen deutlich zu.

Insgesamt zeigt sich, dass sich der Fahrzeugabstand deutlich auf die Druckverteilung und die Druckschwankungen am Fahrzeug auswirkt. So verändert sich die mittlere Druckverteilung an der Fahrzeugfront und am Heck um bis zu $\Delta c_p = 0,25$. Noch deutlicher macht sich der Einfluss im Dachbereich bemerkbar, wo Änderungen des Druckbeiwerts von bis zu 0,4 beobachtet werden. Der mittlere Druck in diesem Bereich reagiert also besonders empfindlich auf Änderungen in der Anströmung. Dagegen steigen die Druckschwankungen an der Fahrzeugfront besonders stark an. Hier treten Änderungen von bis zu $\Delta c_{p,rms} = 35\%$ zwischen der Konstantfahrt und der Hinterherfahrt bei 10 m Abstand auf. Im Vergleich hierzu ändern sich die $c_{p,rms}$ -Werte des Druckbeiwerts um maximal 10 %. Die Veränderungen in der Anströmung wirken sich also am gesamten Fahrzeug auf die mittlere Druckverteilung aus. Im Gegensatz dazu nehmen die Druckschwankungen vor allem im vorderen Fahrzeugbereich zu. Die Veränderungen im Druck und dessen Schwankungen können – im Vergleich zur Konstantfahrt oder den klassischen Windkanalmessungen - zu veränderten, eventuell instationären Kräften auf das Fahrzeug führen.

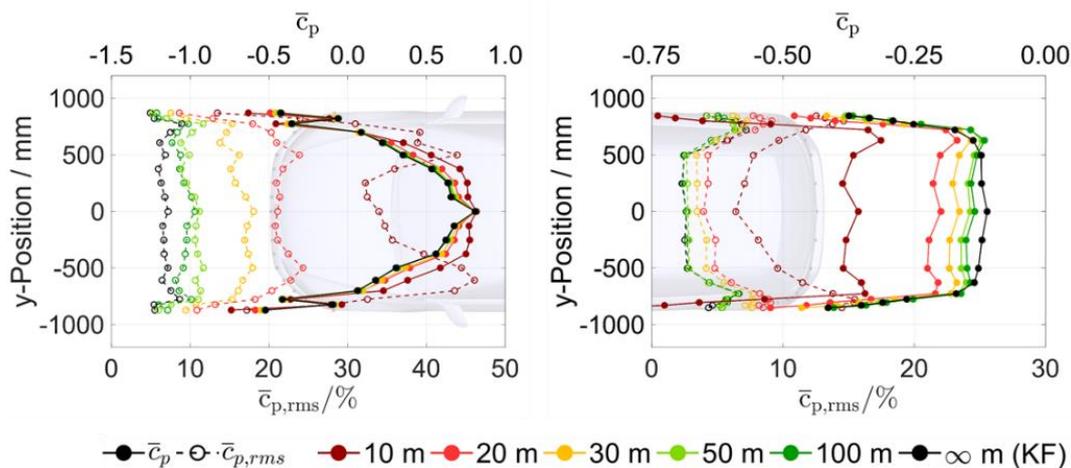


Abbildung 5-19: Verteilung der Druckbeiwerte und ihrer Schwankung für die Konstant- und Hinterherfahrt entlang der Fahrzeugfront (links) und entlang des Hecks (rechts) bei $v_F = 27,8$ m/s.

Instationäre Druckverteilung am Fahrzeug

Es wurde gezeigt, dass das vorherfahrende Fahrzeug einen deutlichen Einfluss auf die Druckschwankungen – insbesondere an der Front des Versuchsfahrzeugs – hat. Die folgende Betrachtung der zeitlichen Druckverläufe soll einen Einblick geben, in welcher Form die Druckschwankungen auftreten und ob sie sich je nach Fahrzeugbereich unterscheiden.

Abbildung 5-20 zeigt einen Vergleich der am Fahrzeug gemessenen zeitlichen Druckschwankungen für die Konstant- und Hinterherfahrten mit 50 m und 10 m Fahrzeugabstand bei einer Fahrgeschwindigkeit von 27,8 m/s. An der Stoßstange (obere Reihe) lässt sich anhand der Druckschwankungen c_p' – ähnlich zu den in Abbildung 5-15 dargestellten Geschwindigkeitsfluktuationen – ein Einfluss des Nachlaufs auf das Versuchsfahrzeug ableiten. Die Schwankung von weniger als $\Delta c_p' = \pm 0,05$, die bei der Konstantfahrt auftritt, wird bei der Hinterherfahrt mit geringer werdenden Fahrzeugabständen stärker. Die Schwankung bei 50 m beträgt $\Delta c_p' = \pm 0,15$, während bei 10 m Abstand eine Schwankung von $\pm 0,3$ erreicht wird. Bei der Hinterherfahrt zeigt sich dabei ein gegenläufiger Trend für die Druckschwankungen auf der linken und rechten Fahrzeugseite. Auch entlang der Symmetrielinie des Fahrzeugs, die über das

Dach verläuft (mittlere Reihe), sind die Druckschwankungen für die Hinterherfahrten größer als an der Front. Die Fluktuationen nehmen dabei über die Lauflänge ab. Am Heck (untere Reihe) unterscheiden sich die Amplituden der Druckschwankungen hingegen deutlich weniger und werden vermutlich primär vom großskaligen Ablösegebiet des Versuchsfahrzeugs beeinflusst.

Die Zeitverläufe des Drucks bestätigen also, dass durch ein vorherfahrendes Fahrzeug verstärkt Druckschwankungen entstehen und diese mit abnehmendem Abstand zwischen den Fahrzeugen zunehmen. Die größten Schwankungen während der Hinterherfahrt finden an der Fahrzeugfront statt und nehmen in Richtung Heck ab, wobei sich die Schwankungen auf der linken und der rechten Seite der Fahrzeugfront unterscheiden. Die Ursache hierfür ist vermutlich, dass durch die Querströmung die Symmetrie der Umströmung des Fahrzeugs verloren geht und so eine Luv- und eine Leeseite entstehen.

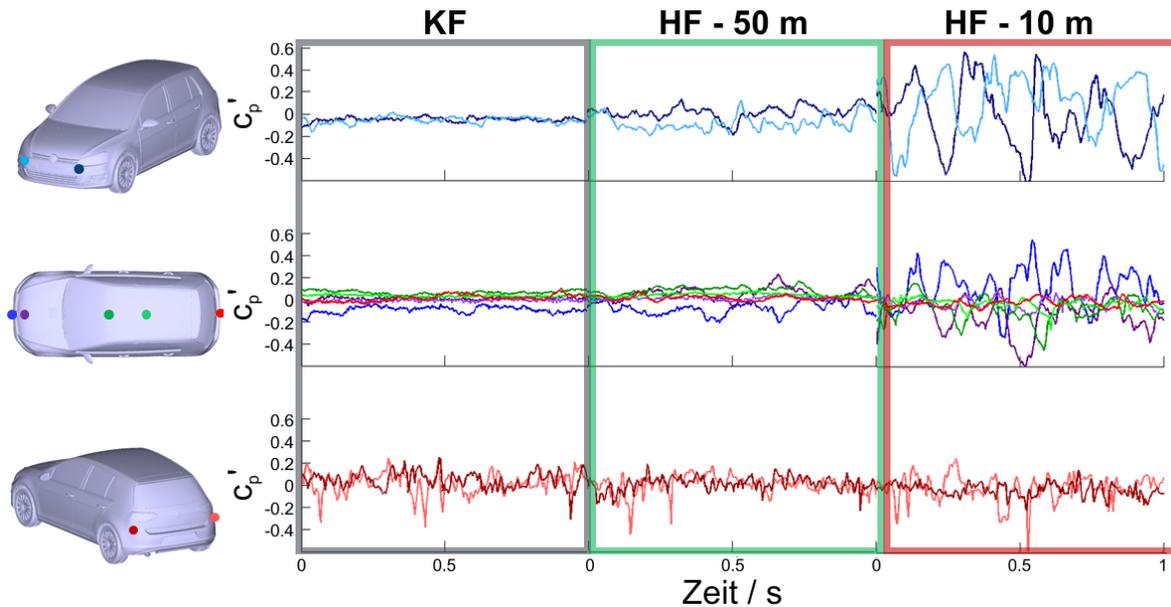


Abbildung 5-20: Vergleich der Druckschwankungen am Fahrzeugarray an der Fahrzeugfront (oben), an der Dachmittellinie (Mitte) und am Heck (unten) für die Konstant- (links) und Hinterherfahrten mit 50 m (Mitte) bzw. 10 m (rechts) Fahrzeugabstand bei einer Geschwindigkeit von $v_F = 27,8$ m/s.

5.2.3 Zusammenfassung der wichtigsten Ergebnisse aus den Hinterherfahrten

Die Hinterherfahrten auf der Teststrecke lieferten umfangreiche Erkenntnisse zu den Anströmverhältnissen und den Drücken am Fahrzeug. Mit Hilfe der Versuche konnte gezeigt werden, dass sich bei der Hinterherfahrt sowohl die Anströmung als auch die Druckverteilung am Fahrzeug deutlich von den bei der Konstantfahrt mit freier Anströmung gemessenen Verteilungen unterscheidet. Neben den mit abnehmenden Fahrzeugabständen zunehmenden Amplituden in den Geschwindigkeits- und Druckverläufen konnte gezeigt werden, dass an der Front zwischen der linken und rechten Seite Unterschiede im zeitlichen Druckverlauf auftreten können. Die Ursache für die unterschiedlichen Druckwerte ist vermutlich eine nicht zu vernachlässigende Querströmungskomponente, wodurch das Fahrzeug asymmetrisch angeströmt wird und wodurch unterschiedliche Drücke auf der Luv- und Leeseite entstehen. Die Spektren der Geschwindigkeiten zeigen, dass insbesondere der niederfrequente Bereich durch die veränderte Anströmung bei unterschiedlichen Abständen beeinflusst wird und dass eine dominierende Frequenz von 2,5 Hz in der Quergeschwindigkeitskomponente existiert. Die Korrelation der Geschwindigkeitsschwankungen weist außerdem auf verringerte Korrelationen der Geschwindigkeitsverläufe über die Fahrzeugbreite mit kleiner werdenden Fahrzeugabständen hin.

Um die Anzahl der zu untersuchenden Parameter im Windkanal einzuschränken, werden die Messergebnisse der Hinterherfahrten außerdem mit den Ergebnissen der Straßenfahrten verglichen. Idealerweise soll ein Referenzfall bestimmt werden, der in Bezug auf die Strömung ähnliche statistische Eigenschaften wie die Straßenfahrt aufweist. Damit könnte die Hinterherfahrt als repräsentativer Fall für die Straßenfahrt angesehen werden. Das wäre ein deutlicher Vorteil, da die Hinterherfahrt einfacher zu beschreiben (immer gleiche Streckenbedingungen, keine weiteren Verkehrsteilnehmer, genaue Wetterdaten) und zu reproduzieren ist. Die Messungen bei der Straßenfahrt spiegeln das reale Bild der Anströmbedingungen auf einer deutschen Autobahn wider. Die Anzahl der Einflussparameter auf die Strömung ist in diesem Fall jedoch sehr groß (z.B. Streckenrandobjekte, Verkehrsdichte, Wetter) und somit schwer erfassbar bzw. reproduzierbar.

Es zeigte sich, dass die Hinterherfahrt hinter einem Transporter mit Kofferaufbau bei einer Geschwindigkeit von 27,8 m/s und 50 m Abstand viele Gemeinsamkeiten mit der Straßenfahrt aufweist. So zeigen Abbildung 5-3 und Abbildung 5-13, dass in beiden Versuchen Anströmgeschwindigkeiten auftreten, die einem Wert von 86 % der Fahrgeschwindigkeit entsprechen.

In Abbildung 5-9 sind alle gemessenen Turbulenzintensitäten und integralen Längenskalen für die unterschiedlichen Geschwindigkeitskomponenten während der Hinterherfahrten aufgetragen. Für die Hinterherfahrten bei $v_F = 27,8$ m/s wurden die Turbulenzintensitäten und integralen Längenskalen für die Versuchsfahrten bei gleichen Abständen über alle Sonden in $z = 0,5$ m gemittelt. In Abbildung 5-21 sind diese Ergebnisse der integralen Längenmaße über die Turbulenzintensitäten aufgetragen. Die Ergebnisse für die Längsrichtung sind links aufgetragen, die Ergebnisse für die Querrichtung rechts. Die Messergebnisse für die unterschiedlichen Fahrzeugabstände sind in verschiedenen Farben dargestellt. Die Konstantfahrt ist in Schwarz dargestellt. Vergleicht man die in Abbildung 5-21 dargestellten Verhältnisse der Turbulenzintensität und des integralen Längenmaßes für die x- (linker Graf) und y-Richtung (rechter Graf) mit den Ergebnissen von der Straßenfahrt (siehe Abbildung 5-4), so zeigt sich, dass die Ergebnisse für die Hinterherfahrt mit 50 m Abstand am besten mit den auf der Straßen auftretenden mittleren Turbulenzintensitäten und Längenskalen übereinstimmen. Die in Abbildung 5-10 dargestellten Verhältnisse der Turbulenzintensitäten für die jeweiligen Geschwindigkeitskomponenten zeigen, dass die von Wordley im Straßenverkehr bestimmten Verhältnisse zwischen den Komponenten der Turbulenzintensität am besten mit den Verhältnissen aus der Hinterherfahrt bei 50 m Fahrzeugabstand übereinstimmen. Auf Grund dieser Gemeinsamkeiten von Straßen- und Hinterherfahrt bei einem Abstand von 50 m und einer Fahrzeuggeschwindigkeit von 27,8 m/s, wurde dieser Fall der Hinterherfahrt als repräsentativer Fall für die Straßenfahrt ausgewählt. Tabelle 5-5 beinhaltet die sich daraus ergebenden wichtigsten Zielgrößen der Hinterherfahrt für die Windkanalversuche. Zusätzlich ist die Konstantfahrt als Beispiel für ideale Bedingungen (kein Verkehr und reine atmosphärische Anströmung) aufgeführt.

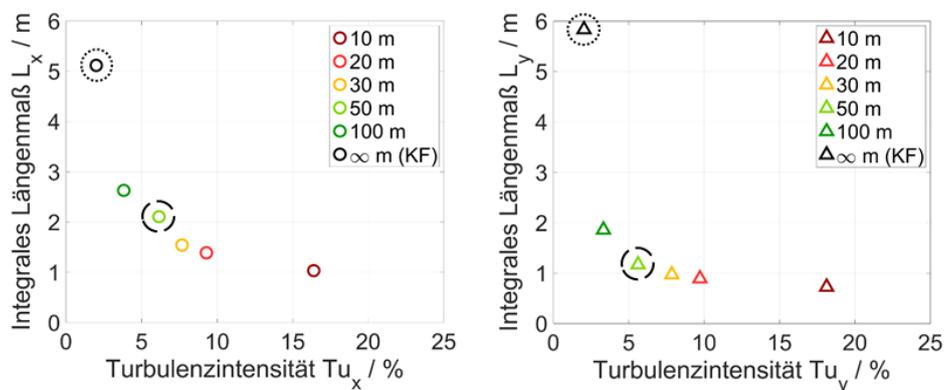


Abbildung 5-21: Mittlere Turbulenzintensitäten Tu_x (links) und Tu_y (rechts) über den zugehörigen integralen Längenmaßen für die Hinterherfahrt bei verschiedenen Abständen sowie der Konstantfahrt mit $v_F = 27,8$ m/s.

Tabelle 5-5: Übersicht der wichtigsten Zielgrößen aus den Konstant- und Hinterherfahrten auf der Teststrecke für die Windkanalversuche.

Parameter	Konstantfahrt	Hinterherfahrt 50 m
β	Winkelbereiche bis $\pm 10^\circ$ mit Standardabweichung von $2,2^\circ - 2,9^\circ$	
Tu_x	3 %	7 %
Tu_y	3 %	6 %
Tu_z	1 %	2 %
L_x	5 m	5 m
L_y	6 m	1 m
L_z	1 m	1 m
$u(t), v(t), w(t)$	Zeitaufgelöste Signale aus den Arraymessungen	
f_x	Frequenzbereich: 0 – 7,5 Hz	Frequenzbereich: 0 – 7,5 Hz
f_y	Amplituden: 0,3 (m/s) ² /Hz	Amplituden: 0,3 (m/s) ² /Hz
f_z	0,5 (m/s) ² /Hz	0,5 (m/s) ² /Hz bei 2,5 Hz
	0,1 (m/s) ² /Hz	0,1 (m/s) ² /Hz
Korrelationskoeffizienten (für $\Delta y = 1,98$ m)	x y z	0,76 0,80 0,11
		0,26 0,55 0,04

5.3 Überholmanöver

Neben der Hinterherfahrt wurde das Überholmanöver als Beispiel für ein typisches Fahrmanöver im Straßenverkehr ausgewählt. Während bei der Hinterherfahrt die Position der Fahrzeuge zueinander gleichbleibt und sich das Versuchsfahrzeug somit immer an derselben Position des Nachlaufs befindet, zeichnet sich das Überholmanöver durch sich stark verändernde Bedingungen während des Versuchs aus. Während des Überholmanövers ändert sich die Lage der Fahrzeuge zueinander kontinuierlich. Am Ende des Versuches befindet sich das Versuchsfahrzeug sogar vor dem überholten Fahrzeug. Aus diesem Grund ist das Überholmanöver ein gut geeignetes Beispiel für eine instationäre Anströmung.

Das Überholmanöver wurde auf der Teststrecke in Trauen untersucht, um möglichst definierte und gut reproduzierbare Versuchsbedingungen zu gewährleisten. Während des Überholvorgangs wurde das Versuchsfahrzeug durchgängig auf der 2. Spur gehalten. Das Versuchsfahrzeug startete hinter dem vorherfahrenden Fahrzeug (Typ: Mercedes Sprinter mit Kofferaufbau). Beide Fahrzeuge hielten eine konstante Geschwindigkeit, wobei das Versuchsfahrzeug mit höherer Geschwindigkeit fuhr und sich somit dem Transporter mit Kofferaufbau annäherte, um diesen schließlich zu überholen.

5.3.1 Instationäre Anströmbedingungen

Auf Grund der zu erwartenden Instationarität der Strömung wird zunächst die Entwicklung der Geschwindigkeitskomponenten während des Überholmanövers näher betrachtet. Die Verläufe der Geschwindigkeitskomponenten sind im Verhältnis zur Fahrgeschwindigkeit v_F in Abbildung 5-22 über den Abstand zwischen den Fahrzeugen für das Überholmanöver dargestellt. Die dargestellten Geschwindigkeiten wurden an den 5 Sondenpositionen an der unteren horizontalen Ebene des Arrays in einer Höhe von $z = 0,5$ m gemessen. Die an den verschiedenen Sondenpositionen gemessenen Daten sind farblich gekennzeichnet. Die Zuordnung kann der schematischen Darstellung des Arrays am Fahrzeug rechts in

Abbildung 5-22 entnommen werden. Die Geschwindigkeit v_F des Versuchsfahrzeugs betrug 33,3 m/s, die des Transporters 22,2 m/s. Zur Bestimmung der exakten Geschwindigkeitsdifferenz wurden am Transporter 2 Reflektoren angebracht. Diese lösten während des Überholmanövers zwei Mal eine im Versuchsfahrzeug mitgeführte Lichtschranke aus. Dadurch konnte die Zeit bestimmt werden, die benötigt wurde, um die Distanz zwischen den beiden Fahrzeugen zurückzulegen. Mit Hilfe dieses Werts lässt sich dann die relative Geschwindigkeit zwischen den Fahrzeugen bestimmen. Basierend auf der relativen Geschwindigkeit und der genauen Position der Fahrzeuge beim Passieren der Lichtschranken kann dann die Zeitinformation aus den Versuchen in einen Abstand zwischen den beiden Fahrzeugen umgerechnet werden. Für die x-Achse ist die Messzeit in den Abstand der Fahrzeugfront des Versuchsfahrzeugs zum Heck des vorherfahrenden Fahrzeugs umgewandelt worden. Negative Distanzen bedeuten, dass sich das Versuchsfahrzeug in Fahrtrichtung noch hinter dem Transporter befindet, 0 m bedeuten, dass die Fahrzeugfront auf Höhe des Hecks ist und positive Werte, dass sich das Versuchsfahrzeug – teilweise oder ganz - neben oder vor dem Transporter befindet.

Das Versuchsfahrzeug erfährt mit abnehmender Distanz ($-100 \text{ m} < x < -20 \text{ m}$) zwischen den Fahrzeugen eine zunehmende Fluktuation in allen Geschwindigkeitskomponenten von bis zu $\pm 0,15 \cdot v_F$ (5 m/s). Für den Abstand von $-20 \text{ m} < x < 0 \text{ m}$ ergibt sich eine deutliche Verringerung der Fluktuationen. Dabei nimmt die Fluktuation von der linken Seite beginnend ab. Im Bereich von $(-5 \text{ m} < x < 5 \text{ m})$ zeigt sich für u und insbesondere für v ein deutlicher Einfluss des lokalen Strömungsfelds um das zu überholende Fahrzeug auf die Anströmung am Versuchsfahrzeug. Für v ist in der Abbildung eine großskalige Schwankung vom Positiven ins Negative (von links nach rechts) und dann auf 0 zu erkennen. Die Geschwindigkeit u wird in diesem Bereich größer als die Fahrzeuggeschwindigkeit. Diese Effekte enden ab einem Abstand von $x = 5 \text{ m}$. Das Überholmanöver ist abgeschlossen und das Fahrzeug befindet sich in der freien Anströmung mit niedrigen Fluktuationen ähnlich wie bei der Konstantfahrt. Die Strömungsgeschwindigkeit u entspricht dann nahezu der Fahrgeschwindigkeit ($u/v_F \approx 1$), während die anderen beiden Strömungskomponenten vernachlässigt werden können ($v/v_F \approx 0$; $w/v_F \approx 0$).

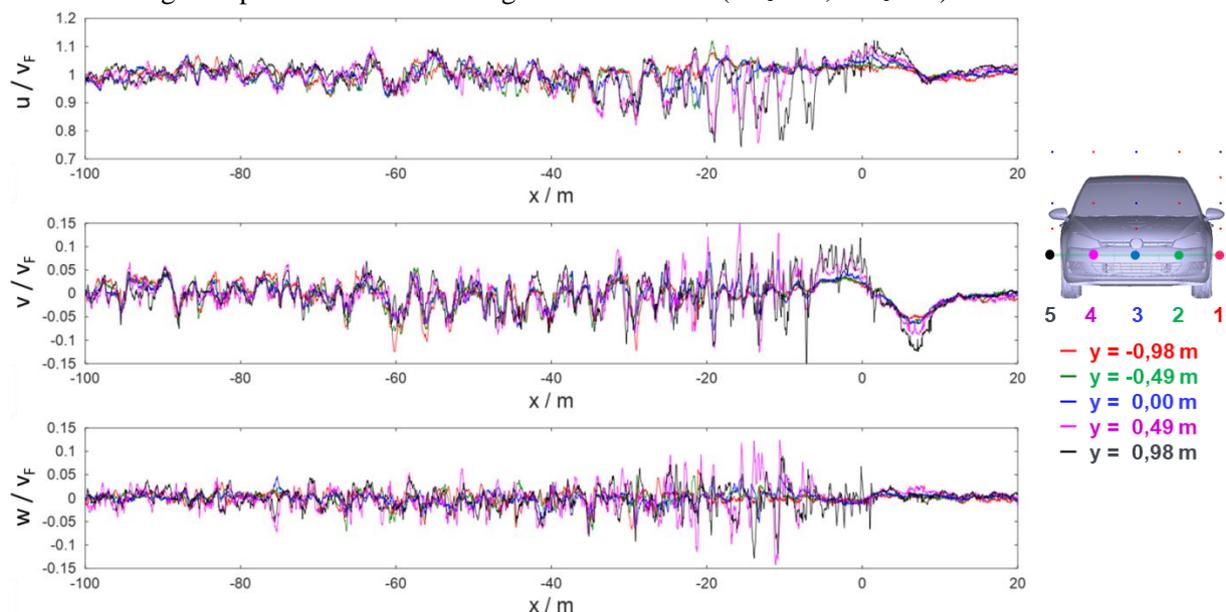


Abbildung 5-22: Darstellung des instationären Verlaufs der Geschwindigkeitskomponenten am Array (von oben nach unten: u/v_F , v/v_F , w/v_F) für ein Überholmanöver auf der Teststrecke für unterschiedliche y -Positionen.

Die Analyse der Geschwindigkeitskomponenten zeigt, dass im Verlauf des Überholmanövers – im Gegensatz zur Hinterherfahrt – sehr unterschiedliche Strömungsverhältnisse auftreten. So verändert sich das Verhalten der Geschwindigkeitskomponenten deutlich mit dem Abstand zwischen den Fahrzeugen.

Auch in Querrichtung über die Fahrzeugbreite ändern sich die absoluten Werte der Geschwindigkeitskomponenten und deren Schwankungen deutlich, während sich bei der Hinterherfahrt beispielsweise die Geschwindigkeiten in Querrichtung über die Fahrzeugbreite nur geringfügig ändern (siehe Abbildung 5-15)

Abbildung 5-23 veranschaulicht die räumliche Verteilung – quer und längs zur Fahrtrichtung – der Geschwindigkeitskomponenten als Konturplots für das Überholmanöver. Die x-Achse stellt – analog zu Abbildung 5-22 – den Abstand zwischen den Fahrzeugen dar. Auf der y-Achse sind die Ergebnisse in Querrichtung dargestellt. Die maximale Breite ist durch die äußeren Sonden am Array bei $y = 0,5$ m definiert. Negative Werte repräsentieren die linke Fahrzeugseite, positive die rechte. Die invertierte y-Achse entspricht damit einer Draufsicht auf das Fahrzeug mit einer Bewegung von links nach rechts durch das dargestellte Geschwindigkeitsfeld. Die Werte zwischen den Sondenpositionen wurden linear interpoliert. Im oberen Konturplot ist die Geschwindigkeitskomponente u im Verhältnis zur Fahrzeugschwindigkeit v_F dargestellt. Der mittlere Konturplot zeigt analog hierzu das Verhältnis von v/v_F und der untere Plot das Verhältnis von w/v_F .

Bei Abständen zwischen $x = -100$ m und $x = -30$ m treten mit abnehmendem Abstand zwischen den Fahrzeugen zunehmende, zufällige Geschwindigkeitsfluktuationen in alle 3 Raumrichtungen auf. Die Schwankungen erreichen dabei gleichzeitig die Fahrzeugfront. In Querrichtung unterscheidet sich die Geschwindigkeit also nur geringfügig. Die Strukturen sind demzufolge – ähnlich wie bei der Hinterherfahrt – in ihrer Ausdehnung in y-Richtung größer als die Fahrzeugbreite. Mit weiterer Annäherung an den Transporter ($x = 30$ m - 0 m) tritt eine regelmäßige Schwankung über x auf. Dies ist beispielsweise an den sich in x-Richtung wiederholenden, dunkelblau dargestellten Bereichen der Geschwindigkeitskomponente für u auf der rechten Fahrzeugseite zu erkennen. Gleichzeitig kommt es zu einem Geschwindigkeitsunterschied zwischen der linken und rechten Seite. An der rechten (fahrzeugnahen) Seite ist ein Geschwindigkeitsdefizit (von $u/v_F < 1$) zu erkennen, während die linke Seite Geschwindigkeiten von nahezu der Fahrzeuggeschwindigkeit aufweist. Die regelmäßige Fluktuation wird auch hier durch den direkten Nachlauf des vorherfahrenden Fahrzeugs – ähnlich wie bei der Hinterherfahrt – erzeugt. Die sich verringernde Ausbreitung einer niedrigen Geschwindigkeit u über die Breite des Arrays deutet darauf hin, dass sich mit kleiner werdendem Fahrzeugabstand der Nachlauf nicht mehr über die gesamte Breite des Versuchsfahrzeugs erstreckt, sondern dass sich nur noch die rechte Fahrzeugseite im kontinuierlich schmaler werdenden Nachlaufgebiet mit reduzierter Geschwindigkeit befindet. Auch die Komponenten v und w weisen auf der rechten Seite größere Schwankungen auf, während auf der linken Seite nur geringe Fluktuationen auftreten. In Querrichtung weist v' kurz vor dem Erreichen des Fahrzeughecks positive Werte auf (-5 m - 0 m). Die Ursache könnte das Einströmen des Fluids aus der Umgebung in das Unterdruckgebiet im Nachlauf des Transporters sein. Auch hier zeigt sich ein Unterschied in der Amplitude der Fluktuation über die Fahrzeugbreite.

Während der direkten Vorbeifahrt am 2. Fahrzeug ist die Geschwindigkeitskomponente u erhöht und die Quergeschwindigkeit negativ; das Fahrzeug wird also von rechts angeströmt. Als Erklärung für beide Effekte dient der Verdrängungseffekt des vorherfahrenden Fahrzeugs. Das anströmende Fluid wird beschleunigt und um die Fahrzeugfront zur Seite verdrängt.

Mit Hilfe der erwähnten Strömungsstrukturen lässt sich das Überholmanöver in 4 Phasen einteilen:

1. Annäherung des Fahrzeugs ($-100 \text{ m} < x < -30 \text{ m}$): Es treten zunehmende, zufällige Geschwindigkeitsschwankungen auf, die gleichmäßig über die Fahrzeugbreite verteilt sind.
2. Direkter Nachlauf ($-30 \text{ m} < x < -5 \text{ m}$): Es entstehen in der Anströmung periodische Strukturen mit asymmetrischem Charakter über die gesamte Fahrzeugbreite. Die rechte Fahrzeugseite erfährt stärkere Fluktuationen als die linke Seite. Mit abnehmendem Abstand erstreckt sich der Bereich der geringeren Fluktuation für u immer weiter von links über das Fahrzeug.
3. Vorbeifahrt ($-5 \text{ m} < x < 5 \text{ m}$): Die Strömung in Fahrtrichtung ist, insbesondere auf der rechten Fahrzeugseite, gegenüber der Fahrgeschwindigkeit beschleunigt. In Querrichtung erfährt das Fahrzeug mit dem Erreichen des Hecks zunächst eine Anströmung von links. Mit dem Erreichen der Fahrzeugfront kehrt sich die Strömungsrichtung um.
4. Freie Anströmung ($x < 5 \text{ m}$): Die Anströmung ist über die gesamte Fahrzeugbreite gleichmäßig ohne große Schwankungen. Die Anströmgeschwindigkeit entspricht hier nahezu der Fahrgeschwindigkeit. Die Anströmung in Fahrtrichtung findet mit der Fahrgeschwindigkeit statt. Die anderen Geschwindigkeitskomponenten werden nicht besonders beeinflusst und liegen im Bereich von 0 m/s .

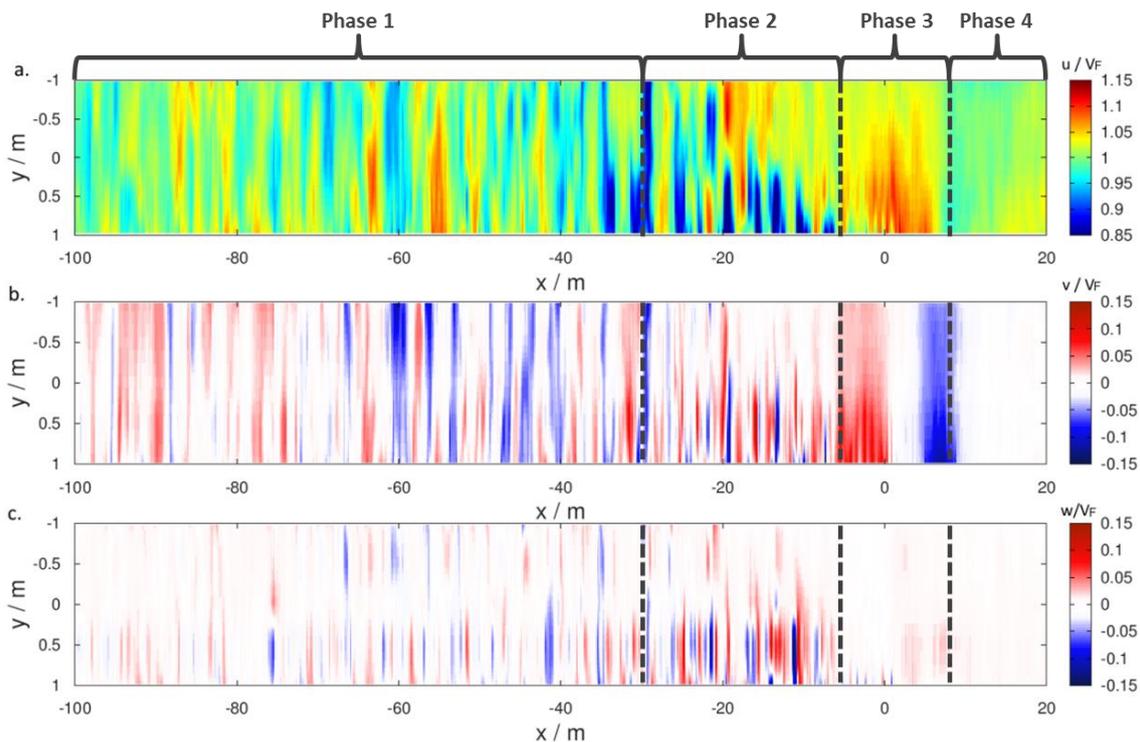


Abbildung 5-23: Räumliche Darstellung der Geschwindigkeitskomponenten in der Anströmung am Array über die Fahrzeugbreite für das Überholmanöver eines Transporters. Markierungen: Unterteilung in die unterschiedlichen Phasen des Überholmanövers.

5.3.2 Instationäre Druckverteilung am Fahrzeug

Wie bei der Hinterherfahrt, dient die Druckverteilung am Fahrzeug beim Überholmanöver als Indikator für den Einfluss der veränderten Anströmung auf das Versuchsfahrzeug und die daraus resultierenden Kräfte auf das Fahrzeug.

In Abbildung 5-24 sind daher die Schwankungen des Druckbeiwertes am Versuchsfahrzeug während eines Überholmanövers über den Fahrzeugabständen dargestellt. Die Schwankungen wurden berechnet,

indem von den an der Druckbohrung gemessenen Drücken die zeitlich gemittelten Drücke an der jeweiligen Position abgezogen wurden. Die oberen Druckverläufe zeigen die Schwankungen links und rechts an der Fahrzeugfront. Der mittlere Graf präsentiert die Drücke entlang des Mittelschnitts am Dach und unten sind die Drücke links und rechts am Fahrzeugheck dargestellt.

An der Stoßstange sind großskalige Druckschwankungen erkennbar, deren Amplitude (bis $c_p' = \pm 0,4$) während der Fahrzeugannäherung ($x < -5$ m) größer wird (obere Reihe). Die linke und rechte Seite zeigen dabei ein gegenläufiges Verhalten für diese großskaligen Schwankungen, bei denen sich ihr Vorzeichen entgegengesetzt verhält. Die Ursache hierfür sind Quergeschwindigkeiten in der Strömung, die den Anströmwinkel verändern. Dies ist besonders gut ab $x = -5$ m zu erkennen. Hier tritt eine große Quergeschwindigkeit mit positivem Vorzeichen (siehe auch Abbildung 5-23b) auf. Für eine freie Anströmung direkt von vorne ist die Umströmung auf der Fahrzeugoberseite auf Grund der symmetrischen Fahrzeuggeometrie auch symmetrisch. Auf Grund der Querkomponente des Fahrzeugs kommt es jedoch zu unterschiedlichen Strömungen auf der windzu- (links) und windabgewandten (rechts) Fahrzeughälfte. Auf der windzugewandten Seite nimmt der Druck zu, während der Druck auf der windabgewandten Seite abnimmt.

Bei einem Abstand von unter 15 m zwischen den Fahrzeugen nehmen die kleinskaligen Druckschwankungen an der linken Messstelle an vorderen Stoßstange deutlich ab. Auf der rechten Seite passiert dies bei 10 m Abstand zwischen den Fahrzeugen. In diesem Bereich tritt das Versuchsfahrzeug aus dem Nachlauf des vorherfahrenden Fahrzeugs aus und bewegt sich durch eine Anströmung, die weniger kleinskalige Schwankungen aufweist. (Vergleiche auch Abbildung 5-22 und Abbildung 5-23). Während die kleinskaligen Druckschwankungen abnehmen, sind großskalige Druckschwankungen im Bereich zwischen -30 m und 20 m vorhanden. Die werden durch das Strömungsfeld um das vorherfahrende Fahrzeug verursacht.

An der Symmetrielinie der Motorhaube treten ebenfalls die großskalige Störungen auf (mittlere Reihe, blaue und lila Kurven). Es fällt auf, je weiter vorne sich die Messstelle befindet, umso früher und deutlicher setzt die großskalige Druckstörung ein.

Die Drücke im Heckbereich (rote Linien) weisen die großskaligen Druckschwankungen erst auf, wenn die beiden Fahrzeuge sich direkt nebeneinander befinden (im Bereich von $x = 0$ m bis 10 m). Auch ist hier kein gegenläufiger Trend zwischen der linken und rechten Fahrzeugseite wie an der Front zu erkennen. Die kleinskaligen Druckschwankungen bleiben über die gesamte Versuchsdauer nahezu unverändert. Ursache hierfür ist vermutlich, dass die Strömung am Heck auf Grund der Fahrzeuggeometrie dauerhaft abgelöst ist und die Druckschwankungen bestimmt. Die Schwankungen liegen bei $c_p' = \pm 0,2$. Dieser Schwankungsbereich deckt sich mit den Schwankungen bei den Hinterherfahrten (siehe Abbildung 5-20). Dort war auch nahezu kein Einfluss des Fahrzeugabstandes auf die Druckschwankungen im Heckbereich festzustellen.

Die Position am Fahrzeug spielt also eine wesentliche Rolle für den Einfluss des Manövers auf die Druckverteilung. Insbesondere die Drücke im vorderen Fahrzeugbereich werden während des Überholmanövers deutlich beeinflusst. Zusätzlich wird deutlich, dass 2 Phänomene im Druckverlauf auftreten: Zum einen tritt eine großskalige Schwankung – insbesondere im Bereich neben dem Transporter – auf, zum anderen finden sich willkürliche, kleinskalige Schwankungen im zeitlichen Verlauf des Drucks. Die kleinskaligen Schwankungen bestimmen insbesondere an der Fahrzeugfront den Druckverlauf, vor allem in der Zeit, in der das Fahrzeug sich hinter dem Transporter befindet.

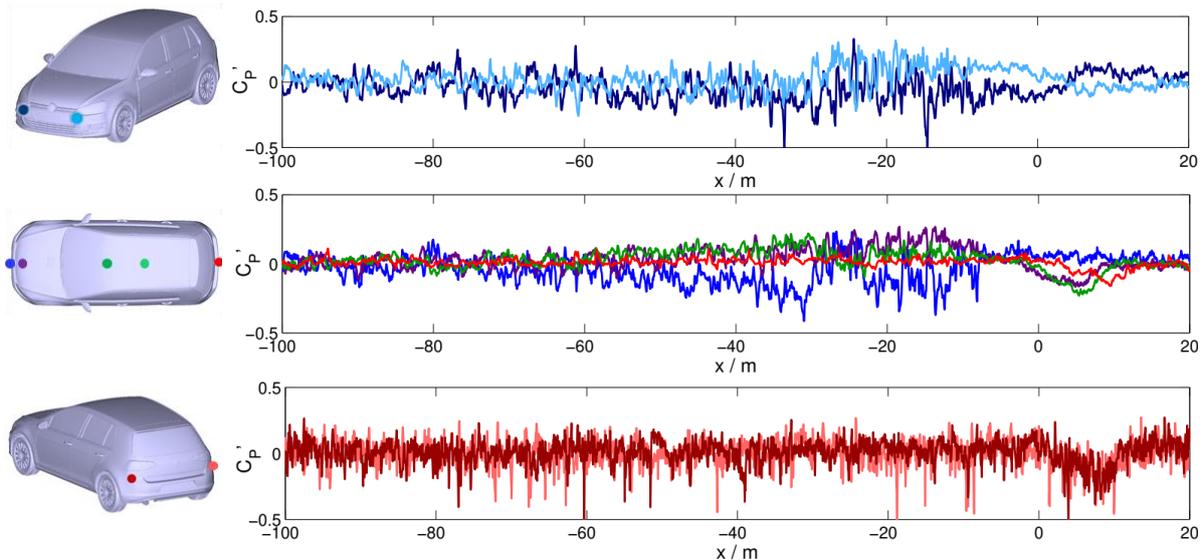


Abbildung 5-24: Entwicklung der Druckschwankungen während eines Überholmanövers an der Fahrzeugfront (oben), entlang der Mittellinie (Mitte) und am Fahrzeugheck (unten).

Die Verteilung der Druckschwankungen an der Fahrzeugfront (oben) und am Fahrzeugheck (unten) ist in Abbildung 5-25 für ein Überholmanöver in Abhängigkeit des Fahrzeugabstands und über die y -Position der Messpunkte als Konturplot dargestellt. Die Positionen der Drucksonden waren über die vordere bzw. hintere Stoßstange verteilt. Positive Druckschwankungen sind in Rot dargestellt, während negative Schwankungen blau gekennzeichnet sind. Geringe Druckschwankungen um den Mittelwert sind weiß dargestellt. Die transienten Drücke an der Front verhalten sich ähnlich wie die in Abbildung 5-23 gezeigten transienten Geschwindigkeiten und zeigen die unterschiedlichen Phasen des Überholmanövers. Die Druckverläufe weisen jedoch nicht nur Schwankungen auf Grund der Anströmung auf, sondern werden zusätzlich, wie schon in Abbildung 5-24 für 2 Drücke an der Fahrzeugfront gezeigt, durch die Geometrie des Fahrzeugs auf der Luv- und Leeseite unterschiedlich beeinflusst. Mit der Annäherung im Nachlauf des vorherfahrenden Fahrzeugs nimmt der Druck in der Fahrzeugmitte bis $x = -30$ m ab. In direkter Umgebung des vorherfahrenden Fahrzeugs ($-10 \text{ m} < x < 10 \text{ m}$) bildet sich dabei über die Breite der Front eine Asymmetrie in der Druckverteilung. Während auf der linken, fahrzeugabgewandten Seite der Druck ansteigt, ist dieser auf der fahrzeugnahen Seite reduziert. Am Fahrzeugheck ist für den größten Teil der Dauer des Überholmanövers nur ein Rauschen um $c_p' = 0$ zu erkennen. Diese Druckschwankungen sind vermutlich größtenteils durch Ablösungen am Heck selbstinduziert. Erreicht das Versuchsfahrzeug jedoch die Rückseite des Transporters, so reduziert sich der Druck auf der Rückseite des Versuchsfahrzeugs auf beiden Seiten bis der Überholvorgang abgeschlossen ist ($0 \text{ m} < x < 10 \text{ m}$).

Eine aus Abbildung 5-24 gewonnene Erkenntnis ist, dass die Druckwerte an der linken und rechten Seite der Fahrzeugfront empfindlicher auf die veränderten Anströmbedingungen reagieren als die Druckwerte am Heck. Die Darstellung der gesamten Front in Abbildung 5-25 bestätigt dieses Ergebnis. Die kleinskaligen Schwankungen nehmen mit geringer werdendem Fahrzeugabstand über die gesamte Breite zu. Der Konturplot zeigt zusätzlich wie sich für den Bereich zwischen -30 m und 10 m eine Asymmetrie in der Druckverteilung über die Fahrzeugbreite an der Front ausbildet. Ebenso kann gezeigt werden, dass der gesamte Bereich am Heck nur vom Überholmanöver beeinflusst wird, wenn sich die Fahrzeuge direkt nebeneinander befinden. Die Änderung des Drucks tritt dabei über die Fahrzeugbreite in gleichem Maße auf und zeigt nicht die Asymmetrie wie an der Front. Ansonsten ist die Druckschwankung im Heckbereich nahezu unabhängig von der veränderten Anströmung während des Überholmanövers und wird hauptsächlich von der am Heck abgelösten Strömung beeinflusst.

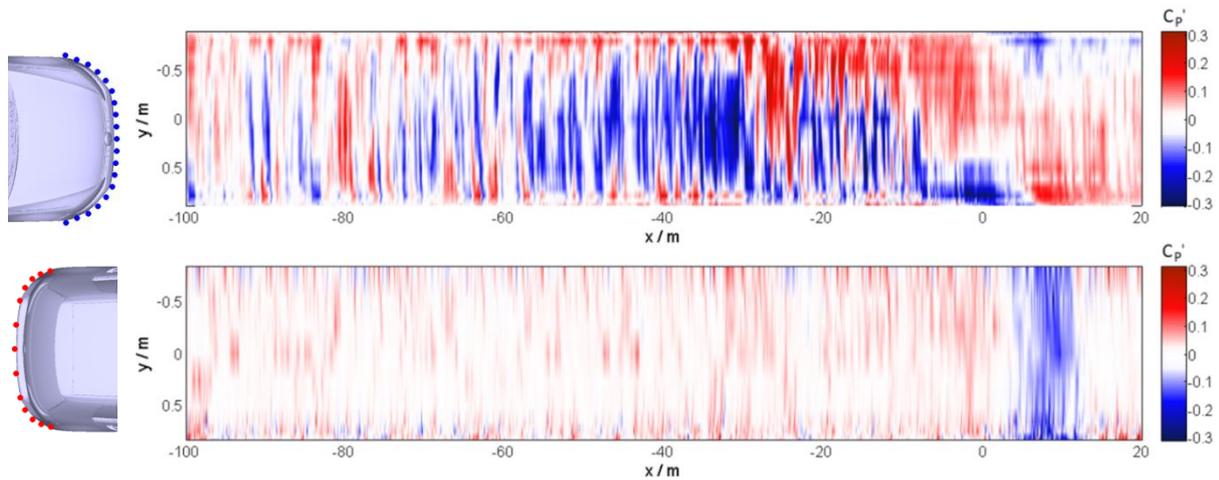


Abbildung 5-25: Verteilung der Schwankung des Druckbeiwerts c_p' über Fahrzeugfront (oben) und -heck (unten) für ein Überholmanöver in Abhängigkeit vom Abstand.

5.3.3 Darstellung des Überholmanövers über mittlere Größen

Wie gezeigt, verändern sich die Strömungseigenschaften während des Überholmanövers deutlich, sowohl in Form von sich ändernden kleinskaligen Strukturen als auch in Form von großskaligen Einzeleffekten. Dies macht es – im Gegensatz zur Hinterherfahrt, bei der sich die Strömungseigenschaften über die Zeit nicht wesentlich ändern – schwierig mit statistischen Größen zu arbeiten. Es soll daher untersucht werden, wie sich die über die Versuchsfahrten gemittelte Geschwindigkeit über die Zeit verhält und zum anderen, ob die Turbulenzintensität der Strömung mittels quasi-statischer Versuche beschrieben werden kann. Die quasi-statischen Strömungszustände wurden erzeugt, indem die beiden Versuchsfahrzeuge um eine Fahrbahnbreite versetzt zueinander mit konstanten Geschwindigkeiten und Abständen gefahren wurden. Das Versuchsfahrzeug befand sich hierzu wie im Überholmanöver links vom Transporter. Als Geschwindigkeiten wurden die Geschwindigkeit des Transporters (22,2 m/s) und des Versuchsfahrzeuges (33,3 m/s) während des Überholmanövers gewählt. Zusätzlich wurde ein Kompromiss bei der mittleren Geschwindigkeit von $v_F = 27,8$ m/s untersucht. Die Abstände wurden zwischen 100 m und 10 m gewählt.

Mittlerer Geschwindigkeitsverlauf

In einem ersten Schritt sollen die mittleren Geschwindigkeiten während des Überholmanövers diskutiert werden, um herauszufinden ob der Ensemblemittelwert geeignet ist, die großskaligen Geschwindigkeitseffekte während eines Überholmanövers zu erfassen.

Abbildung 5-26 zeigt die Verläufe der Geschwindigkeitskomponenten u (oberer Plot) und v (unterer Plot) über dem Abstand zwischen den Fahrzeugen für 5 Wiederholungen des Überholmanövers. Die bei den Fahrten an der mittleren Sonde des Arrays ($y = 0$ m, $z = 0,5$ m) gemessenen Ergebnisse sind in unterschiedlichen Farben dargestellt. Der Verlauf der schwarzen Kurve stellt den Ensemblemittelwert der Einzelmessungen dar. In allen Einzelmessungen sind die zuvor beschriebenen Eigenschaften der 4 Phasen des Überholmanövers erkennbar. In der 1. Phase ($x = -100$ m $< x < -30$ m) unterscheiden sich die Fahrten dabei auf Grund ihrer zufälligen Fluktuationen im Nachlauf in der Amplitude und in der Position der Schwankungen zum Teil deutlich voneinander. In der 2. Phase ($x = -30$ m $< x < -5$ m) sind die Fluktuationen periodisch, jedoch unterscheidet sich die Phasenlage der Fluktuationen zwischen den Fahrten. Die zufällige Lage der kleinskaligen Schwankungen zueinander führt in Phase 1 und 2 dazu, dass die Schwankungen mit Hilfe des Ensemblemittelwerts nicht sinnvoll erfasst werden können, da diese sich im Mittel auslöschen. Die Eigenschaften der 3. und 4. Phase werden jedoch im Mittelwert für die u - und v -Komponente gut erfasst, da hier die großskalige Umströmung des vorherfahrenden Fahrzeugs die

Strömung prägt. Diese ist primär von der Position der Fahrzeuge zueinander abhängig. Die zufälligen, kleinskaligen Fluktuationen überlagern den Geschwindigkeitsverlauf nur durch geringe Schwankungen und spielen daher nur eine untergeordnete Rolle. Das führt dazu, dass sowohl die Geschwindigkeitszunahme in u als auch die Anströmung von zunächst links und dann rechts in der v -Komponente gut im Ensemblemittelwert erfasst werden können.

Der Ensemblemittelwert scheint somit geeignet, die großskaligen Fluktuationen während eines Überholmanövers zu erfassen. Die überlagernden zufälligen kleinen Schwankungen werden jedoch nicht erfasst. Dadurch werden die charakteristischen Eigenschaften der Anströmung eines Überholmanövers deutlich verfälscht, da diese kleinen Schwankungen—wie zuvor gezeigt—ein Hauptmerkmal der Phasen 1 und 2 sind. Des Weiteren werden durch die kleinen Schwankungen in den Anströmgeschwindigkeiten die Druckschwankungen an der Fahrzeugfront beeinflusst.

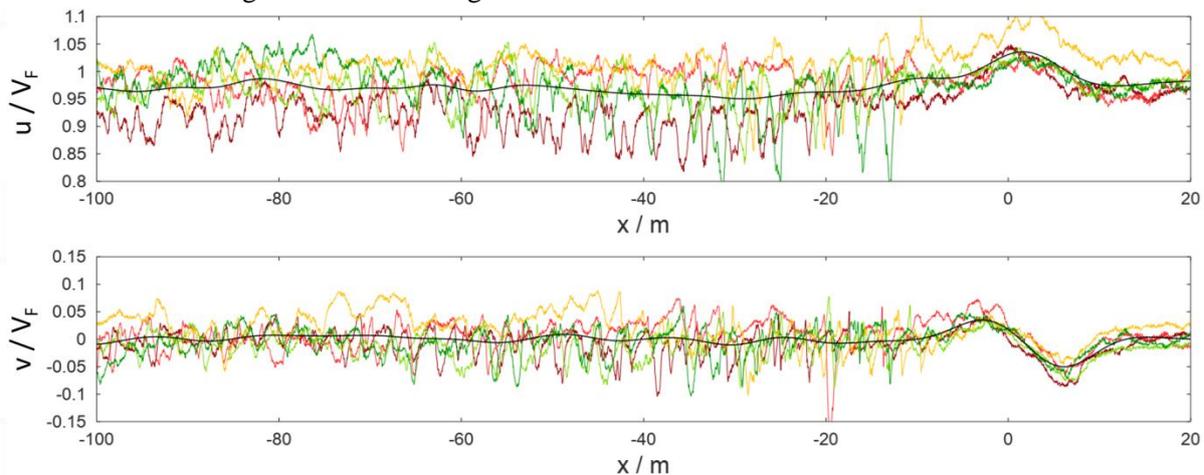


Abbildung 5-26: Verläufe der Geschwindigkeitskomponenten u , v und w an der mittleren Sonde des Arrays für 5 Wiederholungen (farbige Kurven) des Überholmanövers. Für diese Fahrten ist der Ensemblemittelwert geplottet (schwarz).

Entwicklung der Turbulenzintensitäten

Da in der 1. und 2. Phase des Überholmanövers die auftretenden Fluktuationen nicht über den Ensemblemittelwert erfasst werden können, wird im Folgenden versucht diese mit Hilfe einer abgewandelten Form der Turbulenzintensität darzustellen. Der klassische Ansatz zu Bestimmung der Turbulenzintensität ist die Standardabweichung der Geschwindigkeitskomponenten ins Verhältnis zur Geschwindigkeitsmagnitude zu setzen. Da jedoch nicht eindeutig ist, welcher Zeitbereich für das Überholmanöver entscheidend ist, und da sich die Strömungsphänomene im Laufe des Überholmanövers deutlich ändern, ist dieser Ansatz hier nicht sinnvoll. So kann die Wahl des Start- und Endpunktes zur Bestimmung der Turbulenzintensität das Ergebnis deutlich beeinflussen. Um eine Abschätzung vornehmen zu können, wurde daher eine laufende Mittelung der Turbulenzintensität eingeführt. Hierzu wurde ein Fenster von 1 s auf die Geschwindigkeitskomponenten angewendet und die Turbulenzintensitäten über fortlaufende Abschnitte von 1 s (≈ 11 m bzw. 250 Werte) berechnet. Die Fensterbreite von 1 s ist ein guter Kompromiss, um ein Rauschen über einen ausreichend langen Zeitraum zu erfassen, und Einzelereignisse nicht übermäßig stark darzustellen. Zusätzlich wurden für einen quasi-statischen Vergleich Versuchsfahrten durchgeführt, bei denen das Versuchsfahrzeug versetzt zum vorherfahrenden Fahrzeug auf der 2. Spur fuhr. Ähnlich der Hinterherfahrt wurden für diese Fahrten mit versetzten Positionen die Geschwindigkeiten der beiden Fahrzeuge gleich und konstant gehalten. Da nicht eindeutig war, welche Fahrzeuggeschwindigkeit aus dem Überholmanöver entscheidend ist, wurden die Fahrten mit versetzten Positionen sowohl mit der Geschwindigkeit des Versuchsfahrzeugs als auch mit der des langsamer fahrenden, zu überholenden Transporters durchgeführt. Zusätzlich wurde die mittlere Geschwindigkeit aus beiden

Fahrzeuggeschwindigkeiten getestet, um zu untersuchen, ob es einen geeigneten, quasi-statischen Versuchsaufbau zum Nachstellen des Überholmanövers gibt.

Abbildung 5-27 zeigt die Entwicklung der mit laufender Mittelung bestimmten Turbulenzintensitäten für die Komponenten Tu_x (oben), Tu_y (mittig) und Tu_z (unten) über dem Fahrzeugabstand während des Überholmanövers. Die Messungen fanden an der mittleren Sonde ($y = 0$ m; $z = 0,5$ m) des Arrays statt. Die farbigen Kurven repräsentieren wieder die 5 unterschiedlichen Versuchsfahrten. In Schwarz ist der Ensemblemittelwert der Turbulenzintensitäten aufgetragen. Die Ergebnisse aus den quasi-statischen Versuchen sind durch die Symbole \square (22,2 m/s), \circ (27,8 m/s) und \diamond (33,3 m/s) für unterschiedliche Abstände zwischen -100 m und -10 m dargestellt.

Beim Vergleich der Einzelfahrten untereinander fällt auf, dass die Turbulenzintensitäten teils deutlich voneinander abweichen. Dennoch sind einige Trends zu erkennen, die gut vom Ensemblemittelwert erfasst werden. So steigt die Turbulenzintensität mit der Annäherung des Versuchsfahrzeugs an das vorausfahrende Fahrzeug ($-100 \text{ m} < x < -20 \text{ m}$) von $Tu_{x,y} = 2 \%$ auf 4% . Die Abweichung des Mittelwertes von den Einzelfahrten ist dabei bei großen Abständen ($x < -70 \text{ m}$) deutlich kleiner als im Bereich nahe des Transporters ($-30 \text{ m} < x < -70 \text{ m}$). So weicht Tu_x für die Einzelfahrten bei großen Abständen zwischen den Fahrzeugen um kaum mehr als $\Delta Tu_x = 1,5 \%$ ab, während bei den kleinen Abständen Unterschiede von bis zu $\Delta Tu_x = 4 \%$ auftreten. Für $x < 20 \text{ m}$ fällt die Turbulenzintensität auf Werte im Bereich der freien atmosphärischen Anströmung von $Tu_{x,y} = 1,5 \%$ und $Tu_z = 0,5 \%$ ab. Auch die Abweichung der Turbulenzintensitäten der Einzelfahrten ist deutlich reduziert auf $\Delta Tu_{x,y} = 0,2 \%$. Die Schwankungsbreite der Turbulenzintensitäten zwischen den einzelnen Fahrten ist für die 1. und 2. Phase des Überholmanövers ($x < -5 \text{ m}$) also am größten. Das Verhältnis der Turbulenzintensitäten zueinander ($Tu_x: Tu_y: Tu_z$) ist hier $\sim 1:1:0,4$. Das entspricht ungefähr dem Verhältnis der Hinterherfahrt (Abbildung 5-10). Im Vergleich mit den Messungen von Wordley [10] fällt die relative Turbulenzintensität in z-Richtung also auch hier etwas ab, während sie über dem von McAuliffe [12] gemessenen Wert liegt. Auch beim Überholmanöver ist vermutlich – wie bei der Hinterherfahrt – eine höhere Empfindlichkeit von Tu_z gegenüber der Versuchsumgebung (andere Verkehrsteilnehmer, Straßenrandobjekte, vorherfahrendes Fahrzeug) die Ursache für die Abweichungen der Ergebnisse.

Der Vergleich der quasi-statischen Versuchsergebnisse für unterschiedliche Fahrzeugabstände mit dem Ensemblemittelwert aus den Überholmanövern zeigt qualitativ einen ähnlichen Trend. Die Turbulenzintensitäten nehmen mit abnehmendem Abstand zwischen den Fahrzeugen bis $x = -20 \text{ m}$ für alle getesteten Fahrgeschwindigkeiten zu und fallen dann beim kleinsten Abstand von $x = -10 \text{ m}$ ab. Quantitativ wird die Turbulenzintensität in den quasi-statischen Versuchen im Vergleich zu den gemessenen Turbulenzintensitäten überschätzt. Der Ensemblemittelwert erreicht in x- und y-Richtung 4% und in z-Richtung 2% im Maximum. Die mit Hilfe der quasi-statischen Ansätze ermittelten Werte für die Turbulenzintensität sind teilweise mehr als doppelt so hoch und daher ist dieser Ansatz ungeeignet.

Eine Darstellung des Überholmanövers über den Ensemblemittelwert der Geschwindigkeiten zusammen mit der Angabe der quasi-stationären Turbulenzintensitäten ist daher nicht sinnvoll. Die mit laufender Mittelung berechnete Turbulenzintensität ist abhängig von der Wahl der Fensterbreite. Dieses ist insbesondere für den Teil des Überholmanövers problematisch, in dem einmalige Ereignisse auftreten. Das ist der Fall, wenn das Versuchsfahrzeug sich neben dem Transporter befindet. Um ein vollständiges Bild der Strömungsbedingungen für das Überholmanöver zu erhalten, ist eine direkte Nachbildung der Anströmbedingungen daher zu bevorzugen.

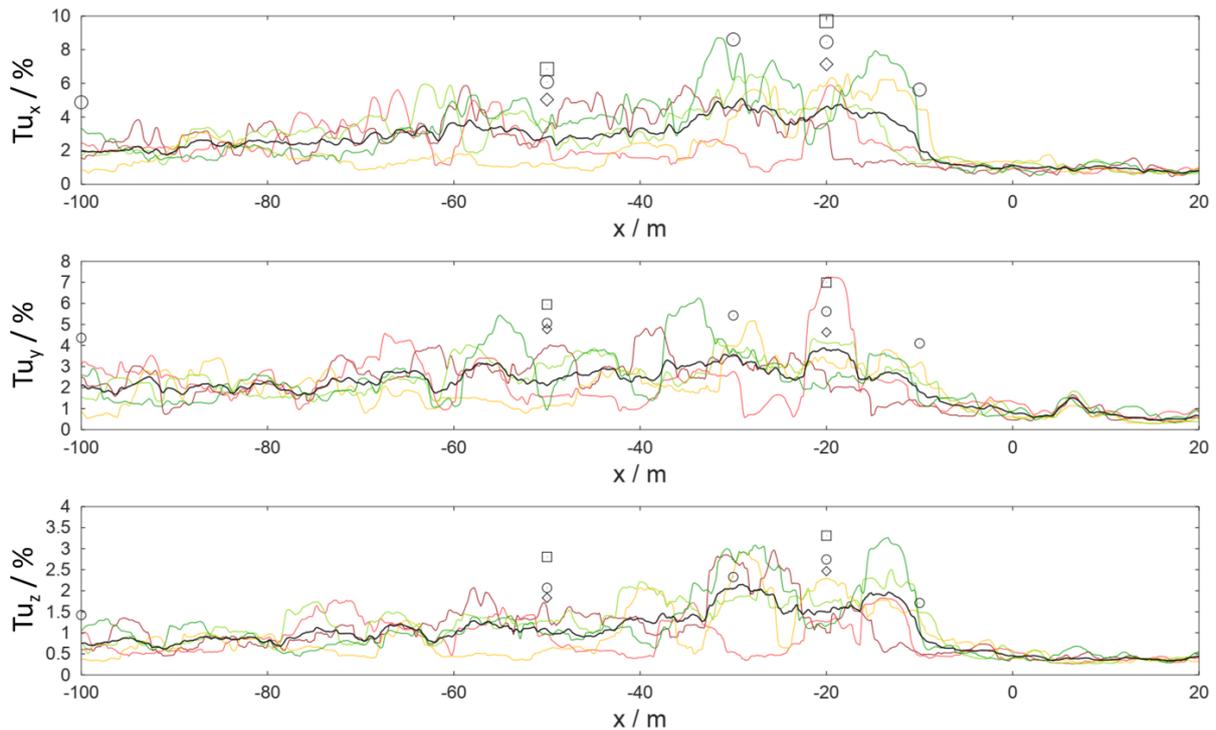


Abbildung 5-27: Laufende Turbulenzintensitäten über ein Zeitfenster von 1 s in Abhängigkeit vom Fahrzeugabstand an der mittleren Sonde des Arrays für 5 Versuchsfahrten (farbige Kurven) des Überholmanövers. Schwarz dargestellt: Ensemblemittelwert der Turbulenzintensitäten aus Versuchsfahrten. Symbole: Vergleichswerte aus Versuchen mit versetzt fahrendem Fahrzeug (linken Spur) bei konstantem Abstand zwischen den Fahrzeugen mit $v_F = 22,2$ m/s (\square); $27,8$ m/s (\circ) und $33,3$ m/s (\diamond).

5.4 Impulsartiger Seitenwind

Die instationäre Anströmung, die ein Fahrzeug in der Realität erfährt, besteht aus einer kontinuierlichen Kombination von Böen. Eine Böe ist in diesem Fall als ein impulsartiger, instationärer Seitenwind zusätzlich zur normalen Anströmung zu verstehen. Beispiele für solche kontinuierlichen Kombinationen können unter anderem die zuvor vorgestellten Fahrmanöver sein. In diesem Kapitel soll eine einzelne Böe – in Form eines impulsartigen Seitenwinds – isoliert unter idealen Bedingungen betrachtet werden. Die instationären Einflüsse, die eine einzelne Böe auf ein reales Fahrzeug auf einer Teststrecke hat, wurden bei BMW auf der Teststrecke in Aschheim mit Hilfe einer Seitenwindanlage untersucht. Die Ergebnisse können genutzt werden, um die instationären Effekte von kontinuierlichen Änderungen in der Anströmung (Kombination aus vielen Böen) auf das Fahrzeug besser zu verstehen. Zusätzlich vermitteln die Ergebnisse einen Eindruck des Einflusses von extremen Böen, die gelegentlich während der Fahrt auf das Fahrzeug auftreffen können.

5.4.1 Charakterisierung des Seitenwinds

Die impulsartig auftretenden Seitenwinde werden mit Hilfe des Sondenarrays charakterisiert. Abbildung 5-28 zeigt die Messungen für die 5 unterschiedlichen relativen Anstellwinkel (β) bei einem Seitenwind von 50 km/h. Dabei handelt es sich um Messungen an der mittleren Sonde ($y = 0$ m bei $z = 0,5$ m), die der Übersichtlichkeit halber allein dargestellt werden. Die Daten sind jedoch repräsentativ für alle 11 Fünflochsonden und alle Messfahrten. Die Schwankungen des Anstellwinkels von bis zu $\Delta\beta = \pm 2,5^\circ$, wenn das Modell an der Seitenwindanlage vorbeifährt, sind in Abbildung 5-28 deutlich zu erkennen.

Diese Schwankungen entsprechen in Anzahl und Abstand ungefähr den 10 einzelnen Lüftern der Anlage. Der Eintritt in die Scherschicht des Seitenwindmoduls für den Winkel $\beta = 30^\circ$ ist in Abbildung 5-28 dargestellt. Der Scherschichtübergang von $\beta = 0^\circ$ bis 30° liegt bei $\Delta x = \sim 3$ m. Darüber hinaus entspricht das Böenprofil in etwa einer Sinuskurve.

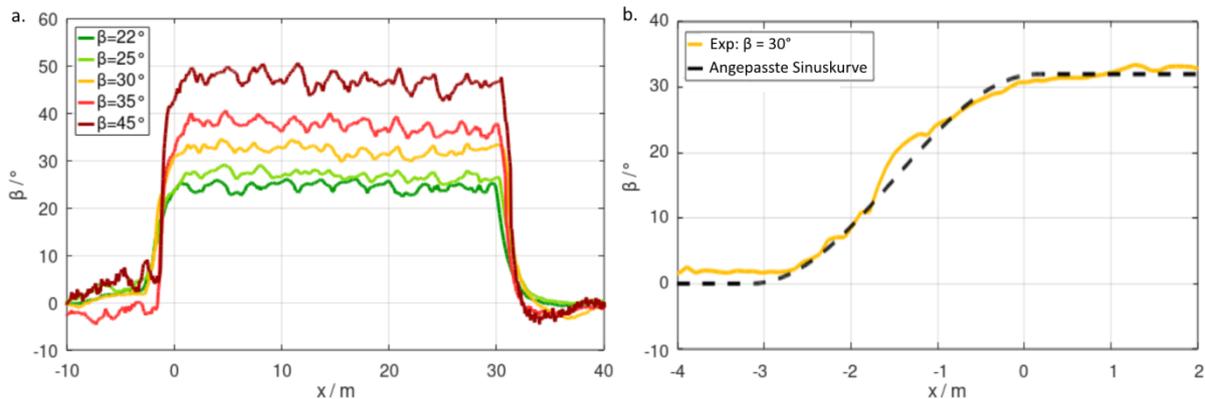


Abbildung 5-28: a) Relativer Anstellwinkel, β , Böenprofile entlang der Seitenwindanlage, b) Scherschichtprofil für einen relativen Anstellwinkel von $\beta = 30^\circ$.

5.4.2 Zeitlich gemittelter Druck

Abbildung 5-29 zeigt den zeitlich gemittelten Druckkoeffizienten für die vordere Stoßstange (a), die Mittellinie (entlang $y = 0$ m) über Motorhaube, Dach und Fahrzeugheck (b) und für die hintere Stoßstange (c) für alle Anstellwinkel. Die Durchschnittswerte für den Seitenwind wurden für $x = 5 - 25$ m berechnet. Für den Fall $\beta = 0^\circ$ ergibt sich über die Breite eine Symmetrie an der Fahrzeugfront (Abbildung 5-29a). Im Gegensatz dazu ist für die Fälle mit Seitenwind deutlich eine Asymmetrie sichtbar. Die Veränderung von c_p verstärkt sich aufgrund ansteigender relativer Werte für v_w im Vergleich zu v_A für größere Anstellwinkel; die Trends und Formen der Kurven bleiben jedoch gleich. Der Stagnationsbereich an der vorderen Stoßstange hat sich zur Leeseite (+y) hin verschoben, wobei die Luvseite (-y) der Stoßstange einen geringeren Druck aufweist, der auf die beschleunigte Strömung um die gekrümmte Oberfläche zurückzuführen ist. Die Fahrzeugfront und die Motorhaube weisen ähnliche lee-/luvseitige Tendenzen auf, während am Dach und am Fahrzeugheck generell niedrigere Drücke als bei der Anströmung von $\beta = 0^\circ$ auftreten.

Die maximale Druckänderung ist in Abbildung 5-29 rechts dargestellt. Sie wurde über einen Bereich von $x = -5 - 35$ m berechnet. Diese Ergebnisse identifizieren die gleichen Geometriebereiche als empfindlich gegenüber Seitenwind wie die Ergebnisse für den zeitlich gemittelten Druck: die Seiten der vorderen Stoßstange sowie die hintere Stoßstange in Leerrichtung. Die Ergebnisse zeigen jedoch 2 zusätzliche Merkmale: Erstens ist an der vorderen Stoßstange die Empfindlichkeit zur Leeseite viel stärker ausgeprägt und tritt über einen kleineren Bereich an der Außenseite der Stoßstange auf. Im Gegensatz dazu ist der luvseitige Rand zwar ebenfalls empfindlich, aber über einen breiteren Bereich, mehr mittig auf der Stoßstange. Die Eindeutigkeit dieser Ergebnisse zeigt, dass potenziell kleine Unterschiede in der fahrzeugspezifischen Geometrie einen großen Einfluss auf die Spitzendruckänderungen haben können, die ein Fahrzeug bei Seitenwind erfährt. Zweitens weist die gesamte Leehälfte der hinteren Stoßstange große Spitzen auf, die in der zeitlichen Durchschnittsdruckverteilung nicht sichtbar sind.

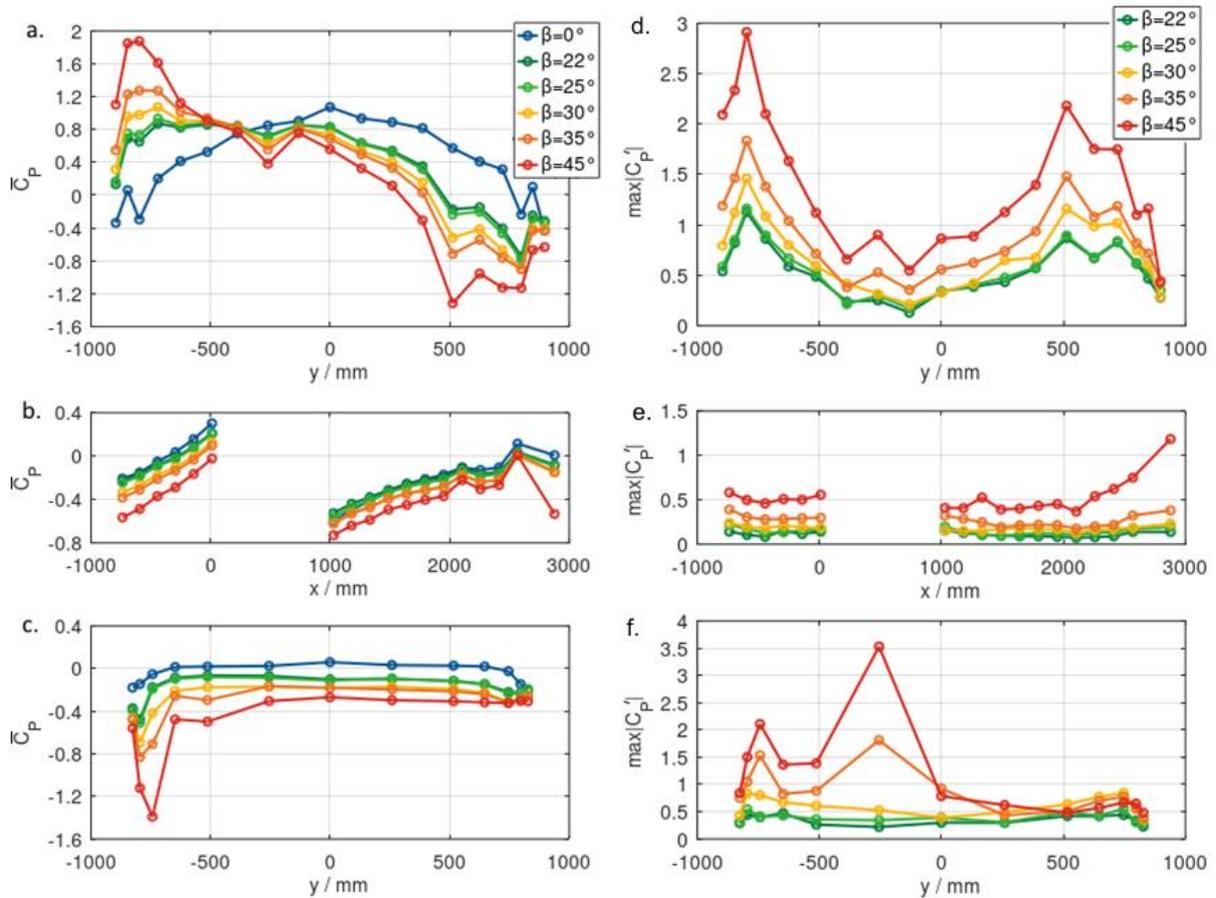


Abbildung 5-29: Zeitlich gemittelter Oberflächendruck (a, b, c) und maximale Änderung des Drucks (d, e, f) unter Seitenwindinfluss für $\beta = 0^\circ; 22^\circ; 25^\circ; 30^\circ; 35^\circ; 45^\circ$ für die vordere Stoßstange (a, d), die Mittellinie über Motorhaube, Dach und Heck ($y = 0$ m) (b, e) und die hintere Stoßstange (c, f).

5.4.3 Instationärer Druck

Der instationäre Druck an ausgewählten Druckbohrungen am Fahrzeug unter einem Anströmwinkel von $\beta = 30^\circ$ ist in Abbildung 5-30 dargestellt. Die vordere Stoßstange, die Mittellinie und die hintere Stoßstange wurden ausgewählt (dargestellt in den Farben rot, grün und blau, wobei die Farbintensität von dunkel nach hell die Entwicklung von der Leeseite zur Luvseite und von der Richtung stromaufwärts bis stromabwärts repräsentiert, wie in Abbildung 5-30a gezeigt), da sie die höchsten und interessantesten Empfindlichkeiten in Bezug auf den Seitenwind aufweisen. Trends, die sich in den zeitlich gemittelten Ergebnissen widerspiegeln, zeigen sich auch in den Ergebnissen für den instationären Druck.

Die Unterschiede in der Ansprechzeit des Oberflächendrucks an den Positionen auf der Lee- und Luvseite sowie in der Mitte sind in Bezug auf den instationären Oberflächendruck, der auf die vordere Stoßstange wirkt, deutlich zu erkennen. Der Druck auf der Luvseite der vorderen Stoßstange steigt sofort an und erreicht sein Maximum bei $x = \sim 0$ m. Im Gegensatz dazu dauert es länger bis der Druck auf der Leeseite das Minimum bei $x = 3$ m - 5 m erreicht. Ähnlich verhält es sich mit dem Druck in der Mitte der vorderen Stoßstange, der allerdings noch länger braucht, um einen Punkt zu erreichen, an dem er sich stabilisiert. Er nimmt dabei zunächst zu, dann ab beziehungsweise sinkt langsam bis zum Bereich $x = 5$ - 10 m. Eine Erklärung für diese instationären Eigenschaften liefert die Zeit, die die Seitenwindtopologie benötigt, um einen stabilen Zustand zu erreichen. Dieser temporäre Effekt zeigt sich auch im Bereich der Mittellinie und im hinteren instationären Druck. Bei $x = 2$ - 4 m beginnt der Druck sich aufgrund des Seitenwinds zu verändern. Er stabilisiert sich jedoch erst bei $x = 10$ m. Im Gegensatz zur

vorderen Stoßstange braucht der Oberflächendruck am Dach und auf der Mittellinie ebenfalls länger, um wieder das Ursprungsniveau des Falls $\beta = 0^\circ$ zu erreichen. Der instationäre Druck kehrt erst nach $x = 40$ m an einigen Stellen wieder zu den Ausgangsbedingungen zurück, Das sind 6 m mehr als die rein räumliche Differenz von 4 m ausmachen sollte. Andere Wissenschaftler machten bei Experimenten im verkleinerten Maßstab ähnliche Beobachtungen [83–88].

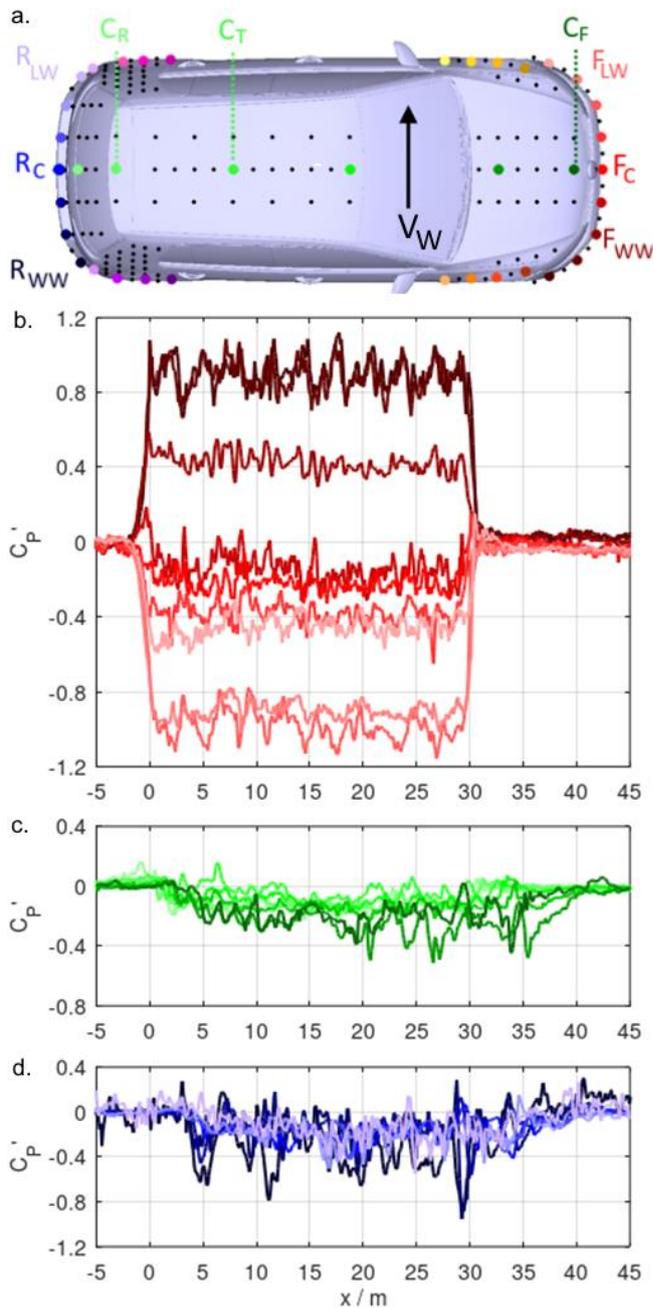


Abbildung 5-30: Instationärer Oberflächendruck für den Fall $\beta = 30^\circ$. a) vordere Stoßstange (dunkel – hell = luvseitig – leeseitig), b) Mittellinie (dunkel – hell = vorne – hinten), c) hintere Stoßstange (dunkel – hell = luvseitig – leeseitig).

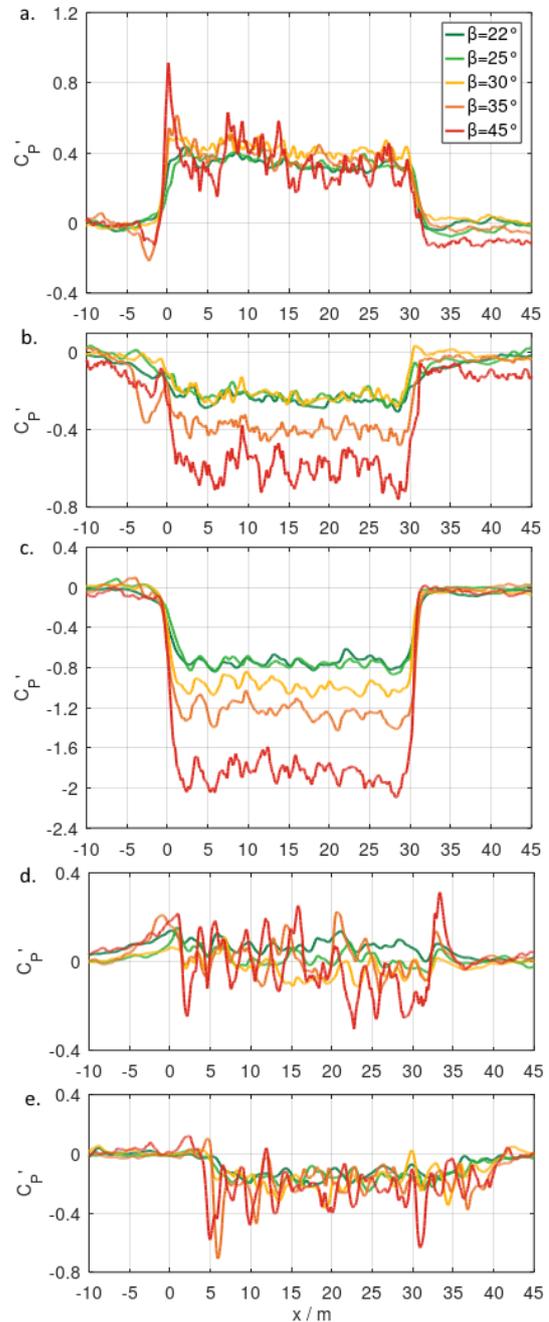


Abbildung 5-31: Druckschwankungen an der a) Luvseite (F_{ww}) der vorderen Stoßstange, b) Mitte (F_c) der vorderen Stoßstange, c) Leeseite (F_{Lw}) der vorderen Stoßstange, d) Dachmittellinie (C_T), e) Heckmitte R_c für alle Anstellwinkel.

Zusätzlich zu dem zeitlichen Effekt, der sich im instationären Druck an der vorderen Stoßstange widerspiegelt, ist ein räumlicher Effekt erkennbar, wenn man die Druckänderung an der vorderen Stoßstange, der Mittellinie und am Heck des Fahrzeugs miteinander vergleicht. Das Auftreten des Seitenwindeffekts dauert länger – zwischen $x = 2$ und 4 m. Das ist auf den Abstand zwischen Fahrzeugfront und Heck zurückzuführen (Fahrzeuglänge = ~ 4 m). Dieser räumliche Effekt tritt abhängig von der Fahrzeuglänge im Vergleich zum zeitlichen Effekt nur in einem begrenzten Zeitraum auf.

Der instationäre Druck auf der Lee- und Luvseite sowie in der Mitte der vorderen Stoßstange, am Dach und in der Mitte der hinteren Stoßstange ist in Abbildung 5-31 für die unterschiedlichen Anstellwinkel dargestellt. Auf die Ergebnisse dieser Übersicht wurde ein 10-Hz-Butterworth-Tiefpassfilter angewendet, was die Vergleichbarkeit erleichtert. Die zeitlichen und räumlichen Effekte treten bei allen getesteten Anstellwinkeln auf. Mehrere Testläufe unter denselben Bedingungen bestätigten die Reproduzierbarkeit. Die Fahrzeuggeschwindigkeit hatte keinen Einfluss auf die Ergebnisse. Weder der zeitliche Effekt noch der räumliche Effekt wären bei einer quasi-statischen Modellierung zu beobachten. Dem entsprechend wäre ein quasi-statischer Versuchsaufbau potentiell nicht geeignet, die globalen Auswirkungen auf das Fahrzeug, seine Kräfte und Momente zu erfassen.

Abbildung 5-32 und Abbildung 5-33 zeigen Farbplots des instationären Oberflächendrucks für die vordere und hintere Stoßstange für alle Anstellwinkel. Der Druck auf die vordere Stoßstange ist beim Losfahren des Modells für den Fall $\beta = 0^\circ$ ($y < 0$ m) zunächst symmetrisch mit hohem Druck in der Mitte, bevor er allmählich in die Region übergeht, die vom Seitenwind beeinflusst wird. Die Farbplots geben weiteren Aufschluss über die räumliche Variation und Kohärenz der Druckschwankungen. Diese Schwankungen sind über große Bereiche der vorderen Stoßstange auf der Luvseite ($-y$) kohärent und können bei größeren Anstellwinkeln eine Größe erreichen, die bis zu einem Drittel der Fahrzeugbreite entspricht. Der Niederdruckbereich auf der äußersten Leeseite ($+y$) bleibt vergleichsweise stabil. Ähnlich sind auf der äußeren Luvseite der hinteren Stoßstange konstant niedrige Drücke zu verzeichnen. Innerhalb dieses Bereichs gibt es große Schwankungen, die bis zur Hälfte der Fahrzeugbreite kohärent sind.

Diese Schwankungen scheinen ihren Ursprung auf der Luvseite zu haben und nehmen dann mit größer werdendem Anstellwinkel in Größe und Ausbreitung zu. Es ist sehr wahrscheinlich, dass diese kohärenten Schwankungen einen beträchtlichen Einfluss auf die Kräfte und Momente am Fahrzeug haben.

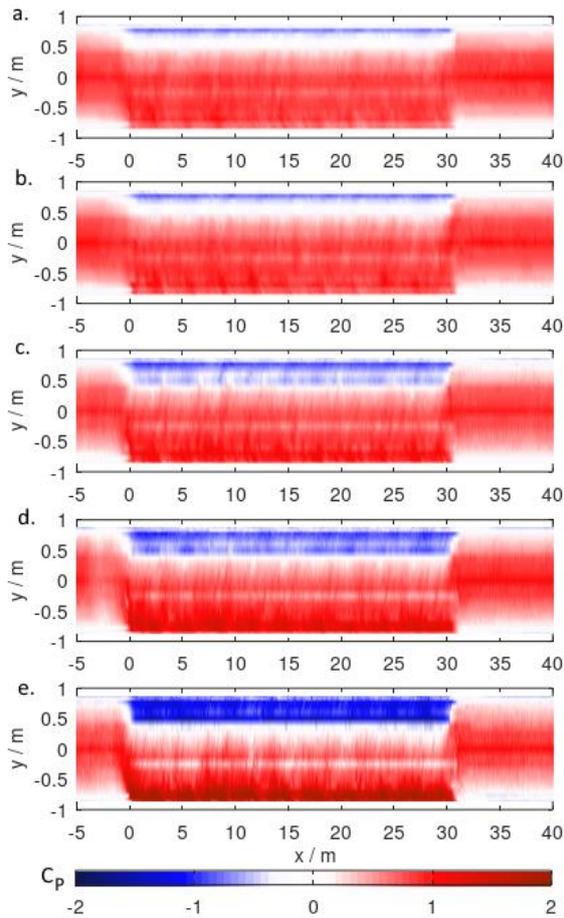


Abbildung 5-32: Instationärer Druck an der vorderen Stoßstange für a) $\beta = 22^\circ$, b) $\beta = 25^\circ$, c) $\beta = 30^\circ$, d) $\beta = 35^\circ$ und e) $\beta = 45^\circ$.

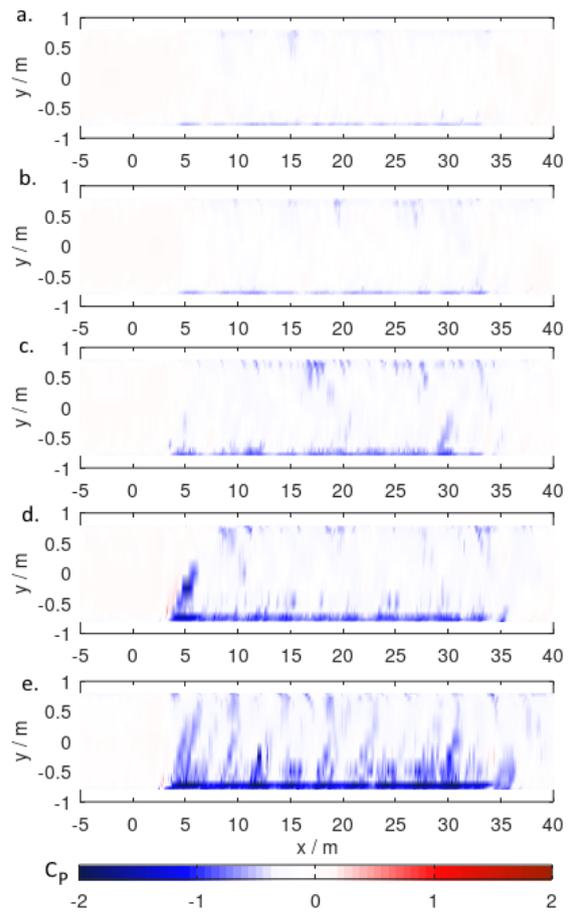


Abbildung 5-33: Instationärer Druck an der hinteren Stoßstange für a) $\beta = 22^\circ$, b) $\beta = 25^\circ$, c) $\beta = 30^\circ$, d) $\beta = 35^\circ$ und e) $\beta = 45^\circ$.

5.4.4 Bewertung/Analyse der Kräfte

Erste Erkenntnisse zum instationären Strömungswiderstand und zur Seitenkraft ergeben sich aus der Integration des Oberflächendrucks an 58 Stellen. Mit Hilfe eines CAD-Modells (Computer-Aided Design) des *VW Golf VII* wurden die Normalenvektoren zur Oberfläche an jeder Druckbohrung identifiziert und dazu verwendet, die Richtung der Oberflächennormalen zu bestimmen. Virtuelle x- und y-Komponenten der Drücke auf Basis der Oberflächennormalen wurden summiert, um eine Größe analog zum Strömungswiderstand und der Seitenkraft zu berechnen. Den einzelnen Bohrungen wurde keine gewichtete Fläche zugeordnet, da diese relativ gleichmäßig über die Fahrzeugoberfläche verteilt waren. Der Beitrag der Drücke an den Bohrungen zu den Kraft- und Momentenberechnungen ist daher gleich. Das Ziel dieser Analyse war es, die globale instationäre Reaktion des Fahrzeugs zu bewerten, anstatt zu versuchen, genaue absolute Werte der Kräfte und Momente zu bestimmen. Die zur Bestimmung der Kräfte ausgewerteten Druckbohrungen, die entsprechenden Druckvektoren mit zugehöriger Richtung sowie die zeitlich gemittelten Kraftvektoren für $\beta = 0^\circ$ und $\beta = 30^\circ$ sind in Abbildung 5-34 dargestellt.

Der instationäre Strömungswiderstand (Abbildung 5-35a) nimmt zunächst ab (25 % - 60 % Abnahme für $\beta = 22^\circ - 45^\circ$), gefolgt von einer leichten, lokalen Zunahme, bevor er sich nach $x = 16 - 20$ m (4 - 5 Fahrzeuglängen) stabilisiert. Dieser Rückgang ist auf Niederdruckbereiche an der vorderen Stoßstange zurückzuführen, die sich entwickeln, bevor sich der Druck im hinteren Bereich reduziert und

letztendlich stabilisiert. Sobald das Fahrzeug den Bereich des Seitenwinds verlässt, steigt der Strömungswiderstand an, und zwar schneller und steiler als beim initialen Rückgang bei 1,5 m (30 % - 75 % für $\beta = 22^\circ - 45^\circ$). Die Ursache für dieses Phänomen kann ebenfalls der Fahrzeugfront zugeordnet werden, da diese fast unverzüglich in den Zustand für $\beta = 0^\circ$ zurückgeht und einen höheren, in der Breite symmetrischen Druck, auf die Fahrzeugfront aufweist. In diesem Abschnitt benötigen Ablösegebiete oder Wirbelbildungen keine Zeit sich zu entwickeln. Der niedrigere Druck auf der Oberfläche des Fahrzeughecks braucht im Gegensatz hierzu länger um anzusteigen und sich wieder bei $\beta = 0^\circ$ zu stabilisieren. Sowohl die Auswirkungen der räumlichen als auch der zeitlichen Phänomene sind deutlich erkennbar, da das Heck den Seitenwindbereich später verlässt und großskalige Ablösegebiete mit sich führt, die sich bei Seitenwind erheblich von den Verhältnissen bei $\beta = 0^\circ$ unterscheiden. Nachdem das Fahrzeug den Seitenwindbereich verlassen hat, fährt es eine Strecke von $x = 15$ m (~ 4 Fahrzeuglängen), bevor sich der Widerstand auf die Konditionen von $\beta = 0$ stabilisiert.

Bei allen getesteten Anstellwinkeln ist ein deutliches Überschwingen der instationären Seitenkraft erkennbar (Abbildung 5-35b). Nach einer kurzen Verzögerung von 2,5 m (0,6 Fahrzeuglängen) tritt eine deutliche Spitze der Seitenkraft auf (40 % - 60 % für $\beta = 22^\circ - 45^\circ$). Bevor sich die Seitenkraft bei $x = 10$ m - 16 m (2,5 - 4 Fahrzeuglängen) stabilisiert, gibt es einen kurzen Abfall. Diese Ergebnisse sind auf die umgehend entstehenden hohen Druckwerte auf der Luvseite der vorderen Stoßstange zurückzuführen, wohingegen der Druck auf der Leeseite etwas Zeit benötigt, um sich zu entwickeln (bis zu $x = 5$ m). Die Druckentwicklung auf der Heckoberfläche dauert noch länger (bis zu $x = 10$ m und 15 m).

Die beschriebenen Kräfte zeigen, dass die lokalen instationären Eigenschaften, die bei der Analyse des instationären Oberflächendrucks beobachtet werden, eine deutliche globale Auswirkung auf das Fahrzeug haben, wenn es einem instationären Seitenwind ausgesetzt ist.

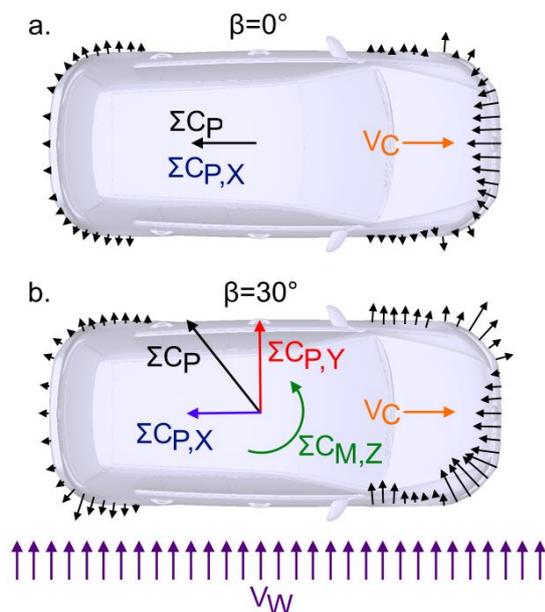


Abbildung 5-34: Druckpositionen, Normalvektoren und resultierende Kraft- und Momentberechnungen für die Anstellbedingungen a) $\beta = 0^\circ$ und b) $\beta = 30^\circ$.

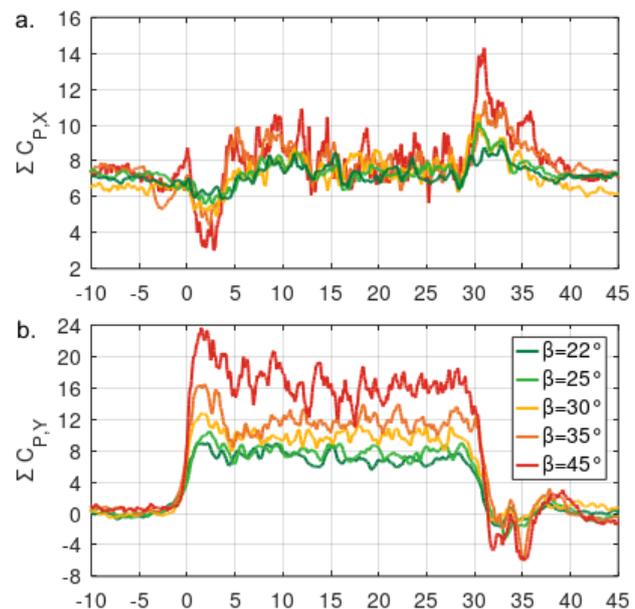


Abbildung 5-35: Aus den Druckmessungen berechneter a) instationärer Strömungswiderstand und b) Seitenkraft.

6 Ergebnisse der Windkanalversuche

Die auf den öffentlichen Autobahnen und der Teststrecke charakterisierte An- und Umströmung des Fahrzeugs wird im folgenden Kapitel mit verschiedenen Hilfsmitteln nachgebildet. Im Projekt sind die in Kapitel 4.2 beschriebenen Windkanäle und Fahrzeugmodelle verwendet worden. Die Ergebnisse sind nach Untersuchungsumgebung gegliedert.

6.1 Messungen im Modellwindkanal der Universität Stuttgart

Im Modellwindkanal der Universität Stuttgart wurden verschiedene Möglichkeiten zur Turbulenzerzeugung im Windkanal sowie verschiedene Fahrzeugmodelle untersucht. Für die Grundlagenuntersuchungen wurden dabei sowohl das generische AeroSUV-Modell sowie der FAT Golf 1:4 eingesetzt. Mit den daraus resultierenden Erkenntnissen wurden anschließend detaillierte Untersuchungen am FAT Golf 1:4 durchgeführt. Diese sind im Abschnitt 6.1.2 beschrieben.

6.1.1 Voruntersuchungen

Die Generierung von instationärer Anströmung in Windkanälen kann mit verschiedensten Ansätzen erfolgen. Grundsätzlich kann die Erzeugung von Turbulenz aber in zwei Bereiche unterteilt werden. Zum einen sind dies statische Turbulenzerzeuger und um anderen dynamische Systeme. Statische Ansätze haben den Vorteil der einfachen Umsetzung und Integration in die Windkanalumgebung. Dadurch sind diese Systeme kostengünstig. Allerdings können mit den statischen Turbulenzerzeugern die Intensität oder das Längenmaß der Turbulenz nicht aktiv variiert werden.

Dynamische Turbulenzerzeuger bieten hingegen die Möglichkeit, innerhalb ihres Parameterraums und durch die Verwendung verschiedener Signale, mehrere Anströmcharakteristiken nachzubilden. Allerdings sind dynamische Systeme durch die aufwendige Integration in die Windkanalumgebung im Gegensatz zu statischen Systemen mit höheren Kosten verbunden. Im Folgenden werden sowohl statische Turbulenzerzeuger, als auch das dynamische System FKFS *swing*[®] untersucht.

Statische Turbulenzerzeugung

Die betrachteten statischen Turbulenzerzeuger sind entweder am Auslass der Düse zur Messstrecke oder in der Vorkammer der Düse angebracht. In Abbildung 6-1 ist die Auswahl der fünf untersuchten statischen Turbulenzerzeuger dargestellt. Die Version (1) *Gitter* ist ein Gitter mit 20×20 mm Maschenweite und 2 mm Drahtstärke. Das *Gitter* ist über die gesamte Düsenaustrittsfläche gespannt und dient zur Generierung von gleichmäßiger Turbulenz in der Messstrecke.

Mit dem Ziel die Hinterherfahrt eines Transporters nachzustellen wurde das *Gitter* für die Varianten (2) *Gitter mit Staugitter* und (3) *Gitter mit Lochblech* erweitert. Bei der Version (2) wurde das Gitter mit einem Streckgitter (6×3-0,6×0,5) in 40 mm Höhe über Boden (b: 390 × h: 280 mm) kombiniert. Während bei Version (3) am Gitter ein Lochblech (Rv 8-16) in 40 mm Höhe über Boden (b: 390 × h: 280 mm) angebracht wurde.

Die Turbulenzerzeuger *TE-150* und *TE-300* sind Profile die sich in der Düsenvorkammer des Modellwindkanals befinden und wurden nicht mit dem Gitter kombiniert. Die Variante *TE-150* besteht aus fünf in der Düsenvorkammer angebrachte Spitzen mit einer Breite von 154 mm am Boden und einer Höhe von 1163 mm. Die Abkürzung beschreibt die Abkürzung von Turbulenzerzeuger (*TE*) und die Breite. Die Ausführung *TE-300* weist mit 308 mm die doppelt Breite wie der *TE-150* bei gleicher Höhe auf.

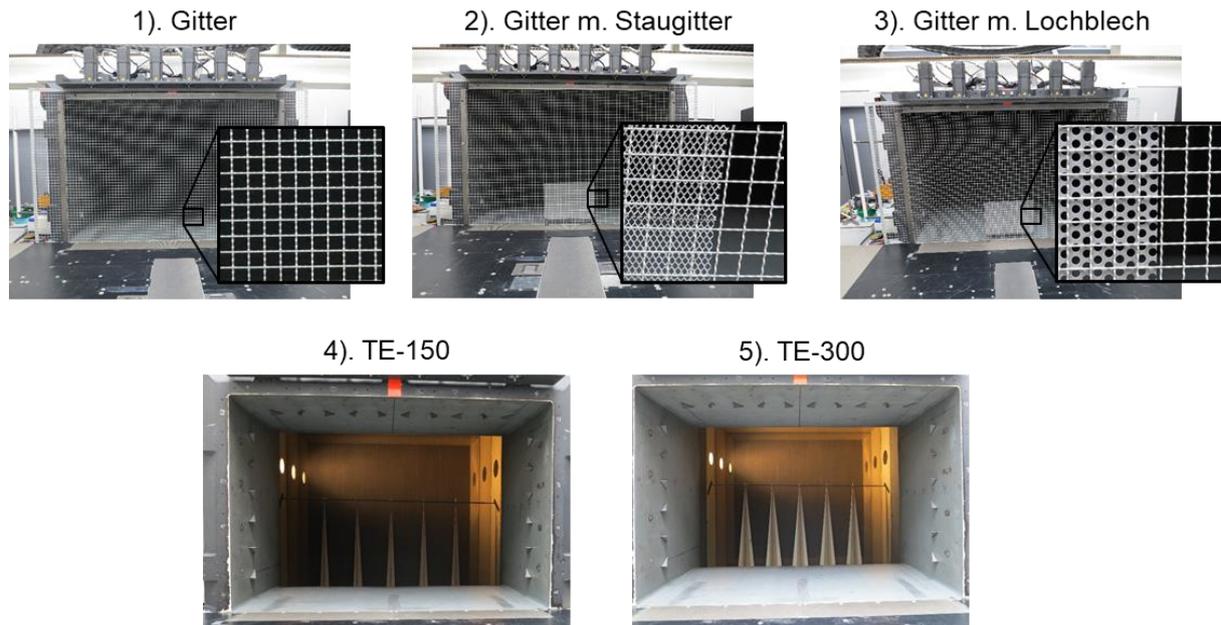


Abbildung 6-1: Statische Turbulenzerzeuger im Modellwindkanal der Universität Stuttgart – (1) Gitter; (2) Gitter mit Staugitter; (3) Gitter mit Lochblech; (4) TE-150 in der Düsenvorkammer; (5) TE-300 in der Düsenvorkammer.

Die Strömungscharakteristiken der vorgestellten statischen Turbulenzerzeuger wurden mit leerer Messstrecke (ohne Fahrzeugmodell) und einer Vierloch-Strömungssonde bei einer Windgeschwindigkeit von 50 m/s erfasst. Die Erfassung der Strömung erfolgte an der Position $x=800$ mm, $y=0$ mm und $z=125$ mm, die nachfolgenden als 800/0/125 mm dargestellt wird. Diese Koordinaten entsprechen der Position der mittleren Fünfloch-Sonden in der unteren Ebene des Arrays, siehe 4.1.1, und liegen damit 250 mm vor der Fahrzeugfront und 125 mm über der Fahrbahn bzw. dem Messstreckenboden.

Die aus den Messungen resultierenden turbulenten Größen aller statischen Turbulenzerzeuger sind für alle Raumrichtungen in Abbildung 6-2 beschrieben. Die Ergebnisse der Fahrversuche sind als gestrichelte Linie in den entsprechenden Farben im Diagramm hinterlegt.

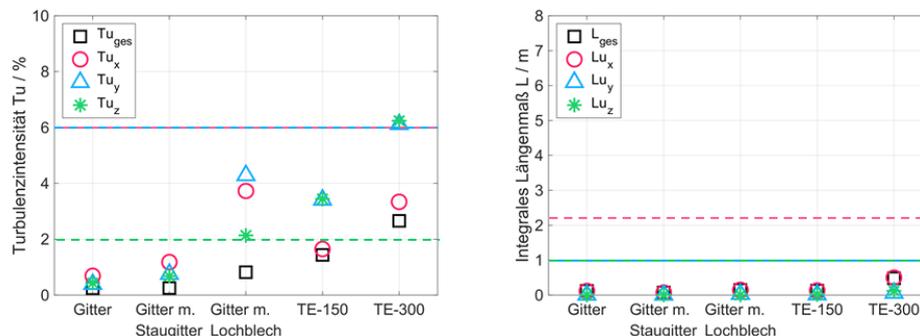


Abbildung 6-2: Turbulenzintensität (links) und integrales Längenmaß (rechts) der statischen Turbulenzerzeuger in alle Raumrichtungen in der leeren Messstrecke bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 50 m/s an der Position 800/0/125 mm; turbulente Größen der Fahrversuche sind mit gestrichelten Linien im Diagramm dargestellt.

Die Turbulenzintensität der Varianten (1) Gitter und (2) Gitter mit Staugitter erzielen für alle Raumrichtungen Werte von $<0,7$ % und $<1,2$ % und damit eine zu geringe Instationarität. Das dabei gemessene integrale Längenmaß liegt für alle Raumrichtungen bei $<0,2$ m und ist ebenfalls geringer als die Ergebnisse der Fahrversuche.

Die Messergebnisse der in Abbildung 6-2 (rechts) dargestellten integralen Längenmaße aller Varianten zeigen Werte von $\leq 0,5$ m und sind damit zu gering um die Fahrversuche nachzubilden.

In Bezug auf die Turbulenzintensitäten ist festzustellen, dass Variante (3) *Gitter mit Lochblech* die Turbulenzintensität in z-Richtung der Fahrversuche erreicht. Die x- und y-Richtung dieser Variante zeigen mit 3,7 % und 4,3 % ebenfalls vergleichbare Ergebnisse. Die Varianten (2) und (3) verursachen darüber hinaus eine Reduzierung der Anströmgeschwindigkeit. Die Strömungsgeschwindigkeit an der Messposition verringerte sich gegenüber der Hauptströmung für die Variante (2) *Gitter mit Staugitter* um 39 % und für die Variante (3) *Gitter mit Lochblech* um 49 %. Die hervorgerufenen Effekte sind zu groß und nicht mit den Fahrversuchen vergleichbar. In Abbildung 6-3 sind die Geschwindigkeitsverhältnisse der Hinterherfahrten auf der Teststrecke und der Variante (2) und (3) im Modellwindkanal dargestellt. Im Modellwindkanal wurde das Verhältnis aus freier Anströmgeschwindigkeit und Anströmgeschwindigkeit in der leeren Messstrecke an der Position 800/0/125 mm gebildet.

Bei den Fahrversuchen trat die maximale Reduzierung der Anströmgeschwindigkeit bei der Hinterherfahrt mit 10 m Abstand zum Transporter (TS-HF 10 m) auf und bewirkte eine Reduzierung von 30 %. Durch die Varianten (2) und (3) wird diese sogar übertroffen. Variante (2) reduziert die Anströmgeschwindigkeit im Modellwindkanal um 33 % und Variante (3) sogar um 50 %.

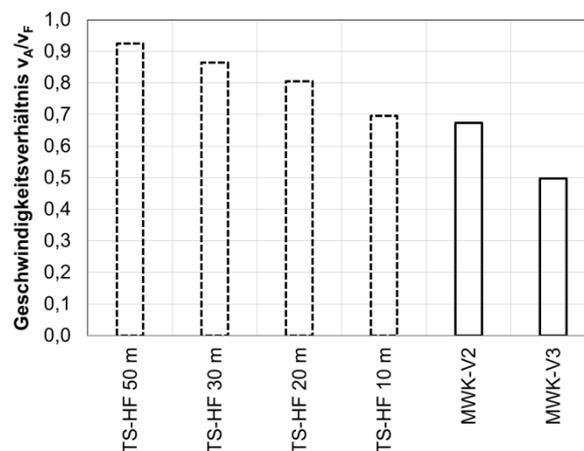


Abbildung 6-3: Geschwindigkeitsverhältnisse der Hinterherfahrt auf der Teststrecke (TS-HF) in verschiedenen Abständen und der stationären Turbulenzerzeuger im Modellwindkanal (MWK-V2 / MWK-V3).

Im Vergleich zu den anderen Varianten ist der Einfluss der Turbulenzerzeuger *TE-150* und *TE-300* auf die Gesamtturbulenzintensität am größten. Für beide Varianten vergrößert sich vor allem die Turbulenzintensität in y- und z-Richtung. Die Turbulenzintensität in x-Richtung wird dabei nicht ausreichend angeregt. Trotzdem bilden die Ergebnisse des *TE-300* im Vergleich zu den anderen stationären Varianten die Fahrversuche bestmöglich ab.

Neben der Turbulenzintensität und dem integralen Längenmaß kann die spektrale Leistungsdichte als weitere Vergleichsgröße herangezogen werden. Die im Modellwindkanal mit den statischen Turbulenzerzeugern in der Strömung herrschenden spektralen Leistungsdichten in die Raumrichtungen sind in Abbildung 6-4 dargestellt. Diese sind für eine bessere Vergleichbarkeit bei $f = 0$ Hz auf den Wert eins normiert. Die Variante *TE-300* zeigt eine vergleichbare Charakteristik wie das Spektrum der Transporter Hinterherfahrt in 50 m Abstand. Die anderen Varianten zeigen größere Abweichungen zu den Fahrversuchen und bilden die spektralen Leistungsdichten nicht so gut wie der *TE-300* ab.

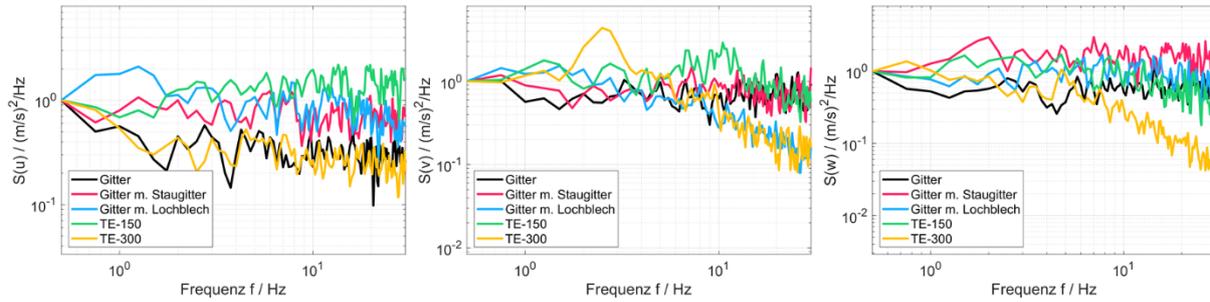


Abbildung 6-4: Spektrale Leistungsdichte der statischen Turbulenzerzeuger in die drei Raumrichtungen (von links nach rechts – x, y, z) in der leeren Messstrecke an der Position 800/0/125 mm.

Abschließend wurden die durch die Turbulenzerzeuger hervorgerufenen Einflüsse auf die Oberflächendrücke quantifiziert. Im Rahmen der Voruntersuchungen stand das Fahrzeugmodell des FAT Golf 1:4 noch nicht zur Verfügung. Daher wurden die Messungen mit dem in Kapitel 4.1.1 vorgestellten Aero-SUV durchgeführt.

In Abbildung 6-5 sind die Ergebnisse der Messungen im Modellwindkanal mit den verschiedenen Turbulenzerzeugern dargestellt. Die Druckbeiwerte und deren Schwankungen sind für den Mittelschnitt (links) und einen z-Schnitt (rechts) an der Fahrzeugfront abgebildet. Die stationäre Anströmung ohne Turbulenzerzeuger wird mit den Ergebnissen der *Referenz* dargestellt. Die Varianten *Gitter mit Staugitter* und *Gitter mit Staublech* verändern den Druckbeiwert an der Fahrzeugfront maßgeblich und sind daher nicht geeignet um die Fahrversuche nachzustellen. Die anderen statischen Turbulenzerzeuger haben nur einen geringen Einfluss auf den Druckbeiwert.

Die Schwankungen der Oberflächendrücke geben einen Einblick in die instationären Umströmung und sind daher von großer Bedeutung. Durch die Varianten *Gitter*, *Gitter mit Staugitter* und *TE-150* werden nur geringe Auswirkungen auf die Schwankungen der Fahrzeugoberfläche erzielt und bilden nur eine leichte Steigerung im Vergleich zur *Referenz*. Die Variante mit der größten Vergleichbarkeit zu den Fahrversuchen ist, wie bei den zuvor vorgestellten Resultaten, der *TE-300*. Die Schwankungsgrößen an der Stoßstange und Motorhaube sind vergleichbar mit der Transporter-Hinterherfahrt bei 50 m. Die Schwankungen im Dachbereich sind geringer als bei den Fahrversuchen zeigen aber den gleichen Verlauf.

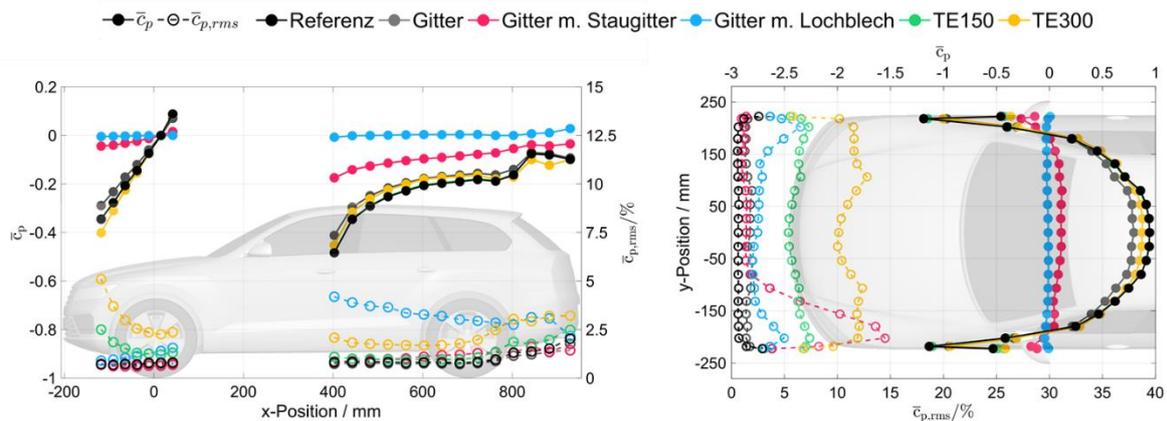


Abbildung 6-5: Mittlere Druckbeiwerte und deren Schwankung entlang des Mittelschnitts der Fahrzeugmotorhaube und des -dachs (links) und im z-Schnitt der Fahrzeugfront (rechts) im Modellwindkanal mit verschiedenen statischen Turbulenzgeneratoren.

Insgesamt konnten die statischen Turbulenzerzeuger die bei den Fahrversuchen identifizierten Charakteristiken größtenteils nicht abbilden. Die vielversprechendsten Ergebnisse zeigte dabei noch der *TE-300*. Allerdings erzeugt dieser eine gesteigerte Turbulenzen in z -Richtung, die so auf der Straße nicht vorhanden ist, und verursacht, wie alle statischen Turbulenzgeneratoren, sehr kleine integrale Längenmaße. Aus diesen Gründen ist festzustellen, dass die auf der Straße herrschende Strömungssituation mit den statischen Turbulenzgeneratoren nicht vollständig nachgebildet werden kann.

Dynamische Turbulenzerzeugung

Als dynamischer Turbulenzerzeuger kommt im Modellwindkanal der Universität Stuttgart das System FKFS *swing*[®] zum Einsatz (siehe Kapitel 4.2.1). Die verwendeten Eingangssignale sind zum einen aus den Fahrversuchen auf der Teststrecke, siehe Abbildung 6-6 (links), und zum anderen generische Signale die auf den Normalverteilungen der Anströmwinkel und spektralen Frequenzinhalten basieren, siehe Abbildung 6-6 (rechts). Als Signale für den Windkanal wurden aus den Fahrversuchen auf der Teststrecke die Anströmwinkel des in Kapitel 4.1.1 vorgestellten 2D-Arrays angewendet. Die Messdaten der mittleren Strömungssonde in der Ebene 0,5 m über dem Boden ($y = 0 / z = 0,5$ m) und einer Fahrgeschwindigkeit von 27,8 m/s wurden dafür herangezogen.

Die Signale werden als *KF* für Konstantfahrt (freie Fahrt) und *HF* für die Hinterherfahrt des Transporters in 50 m Abstand bezeichnet. Die Benennung 1z1 und 1z4 sind den zwei Buchstaben nachgestellt und geben eine Auskunft über die Skalierung der Signale. Dabei steht 1z1 für das Signal der Fahrversuche, also im Maßstab 1:1, und 1z4 für das skalierte Signal im Modellmaßstab.

Für die Skalierung des Signals wurde die, in Kapitel 2.3 vorgestellte, Strouhal-Zahl verwendet. Ein Gleichgewicht für die Strouhal-Zahl im Fahrversuch und bei den Modellwindkanalmessungen stellt sich bei einer Steigerung der Frequenz der der Signale um den Faktor 7,2 im Modellmaßstab ein. Dieser Faktor basiert auf der Skalierung des Fahrzeugmodells (Maßstab 1:4) und dem Geschwindigkeitsverhältnis von 27,8 m/s im Fahrversuch und 50 m/s im Modellwindkanal und bedeutet eine Beschleunigung des Signals.

Das *HF1z1*-Signal kann skaliert nicht mit dem FKFS *swing*[®]-Systems abgebildet werden, da die Systemgrenzen dies aufgrund der starken Schwankungen nicht erlauben. Aus diesem Grund können nur die Signale *KF1z1*, *KF1z4* und *HF1z1* verwendet werden.

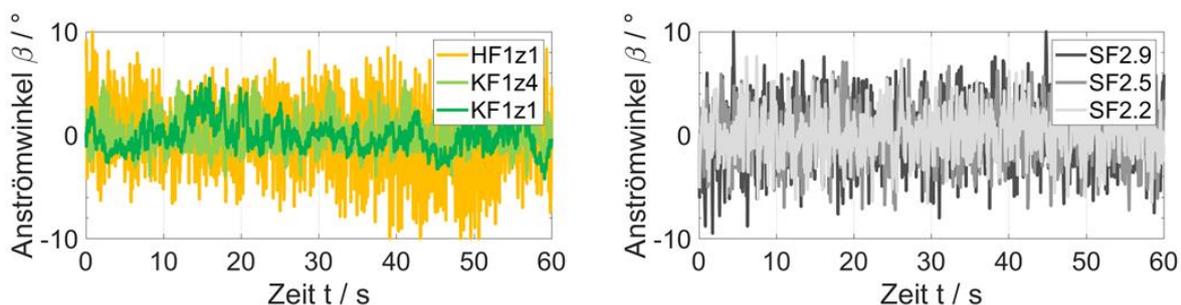


Abbildung 6-6: Signale aus den Fahrversuchen auf der Teststrecke (links) und generische Signale zur Nachbildung der Straßenfahrt (rechts) zur Anregung der Strömung mit FKFS *swing*[®].

Neben den Signalen von der Teststrecke bilden die drei generischen Signale die Kompassfahrten nach. Die Buchstaben *SF* stehen dabei für Straßenfahrt und ihnen nachgestellt ist die Standardabweichung der Winkelverteilung hinterlegt. In Tabelle 5-3 sind die Standardabweichungen der Kompassfahrten mit verschiedenen Verkehrsdichten dargestellt. Daraus wurde die minimale und maximale Standardabweichung von 2,2° und 2,9° verwendet. Zusätzlich wurde ein Signal in der Mitte der beiden Extrema mit

der Standardabweichung $2,5^\circ$ erstellt. Daraus resultieren die Signale *SF2.2*, *SF2.5*, *SF2.9* und weisen in der genannten Reihenfolge zunehmende Anströmwinkel auf.

Die im Windkanal mit den Signalen erzeugten turbulenten Größen wurden bestimmt und mit den Ergebnissen der Fahrversuche auf der Teststrecke verglichen. In Abbildung 6-7 sind die integralen Längenmaße über der Turbulenzintensität der verschiedenen Signale in x- und y-Richtung vor dem Fahrzeugmodell aufgetragen. Die Messungen wurden, wie bei den statischen Turbulenzerzeugern, am Punkt 800/0/125 mm äquivalent zur am mittleren Strömungssonde in der unteren Ebene des 2D-Arrays ermittelt. Dies entspricht einem Abstand von 0,25 m zum Fahrzeugmodell in x-Richtung.

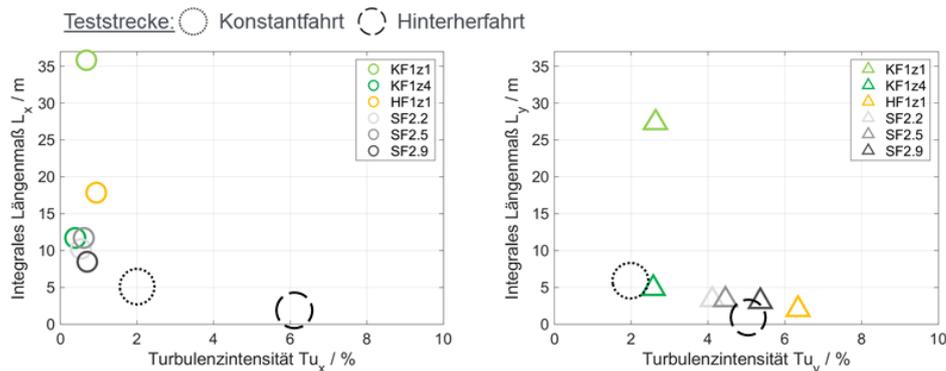


Abbildung 6-7: Turbulenzintensität über integralem Längenmaß in x-Richtung (links) und y-Richtung (rechts) verschiedener Signale mit FKFS *swing*[®] in 0,25 m Entfernung vor dem FAT Golf 1:4 bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 50 m/s an der Position 800/0/125 mm; Zielwerte der Fahrversuche sind mit gestrichelten Kreisen dargestellt.

Das FKFS *swing*[®]-System regt die Strömung dynamisch mit verschiedenen Anströmwinkeln an und beeinflusst daher hauptsächlich die y-Richtung. Die Turbulenzintensität und das integrale Längenmaß in x-Richtung werden aus diesem Grund nur geringfügig beeinflusst. In Abbildung 6-7 (links) ist zu erkennen, dass die Turbulenzintensität in x-Richtung für alle Signale $<1\%$ liegt. Der Unterschied der integralen Längenmaße von *KF1z1* und *KF1z4* ist zu erkennen.

In y-Richtung findet die Hauptanregung durch FKFS *swing*[®] statt und in Abbildung 6-7 (rechts) sind die resultierenden turbulenten Größen im Modellwindkanal in dieser Richtung dargestellt. Die Ergebnisse der *KF1z1*, *KF1z4* und *HF1z1* zeigen für die Turbulenzintensität der y-Richtung gesteigerte Werte gegenüber den mittleren Werten der Fahrversuche. Das integrale Längenmaß stimmt für *KF1z4* mit der Konstantfahrt auf der Teststrecke sehr gut überein. Das Signal *HF1z1* zeigt im Vergleich mit der Hinterherfahrt gesteigerte Werte.

Die generischen Signale (*SF2.2-SF2.9*) zeigen in y-Richtung im Vergleich zu den Kompassfahrten, siehe Abschnitt 5.1.3, geringere Werte. Bilden jedoch mit den Turbulenzintensitäten in y-Richtung für *SF2.2* von 4,1 %, für *SF2.5* von 4,5 % und für *SF2.9* von 5,4 % die Grundlage für den Vergleich verschiedener Anströmungen.

Um die Ergebnisse der statischen Turbulenzerzeuger besser vergleichen zu können sind die Oberflächendruckmessungen mit FKFS *swing*[®] für die Signale aus den Fahrversuchen auf der Teststrecke sowohl mit dem AeroSUV als auch dem FAT Golf 1:4 durchgeführt worden. Die Straßenfahrt-Signale sind nur in Kombination mit dem FAT Golf 1:4 untersucht worden.

In Abbildung 6-8 sind die mittleren Oberflächendrucke und deren Schwankungen für den AeroSUV im Modellwindkanal mit FKFS *swing*[®] dargestellt. Die Druckbeiwerte im Mittelschnitt weichen im hinteren Bereich von der Referenzmessung auf. Besonders auf der Heckscheibe des AeroSUV reduzieren sich die Druckbeiwerte der instationären Anströmung gegenüber dem Referenzfall. Im z-Schnitt an der

Fahrzeugfront weichen die Druckbeiwerte an den Seiten des Frontstoßfängers ab und erfahren im Vergleich zur Referenzmessung eine Steigerung. Die Trends der Druckbeiwerte an der Heckscheibe und dem Seitenbereich der Fahrzeugfront deuten auf die Steigerung des Luftwiderstandsbeiwerts unter instationärer Anströmung hin.

Die Schwankungen des Oberflächendrucks sind im Mittelschnitt des AeroSUV im Vergleich zu den Fahrversuchen zu gering. Dies wird durch die nur geringfügig angeregte Schwankung der Strömungsgeschwindigkeit in x-Richtung verursacht. An der Fahrzeugfront zeigen sich im z-Schnitt im Seitenbereich Schwankungen der Fahrversuche. Allerdings weisen die Ergebnisse in der Fahrzeugmitte zu geringe Schwankungen auf. Dies ist genau wie im Mittelschnitt den geringen Fluktuationen in x-Richtung zuzuschreiben.

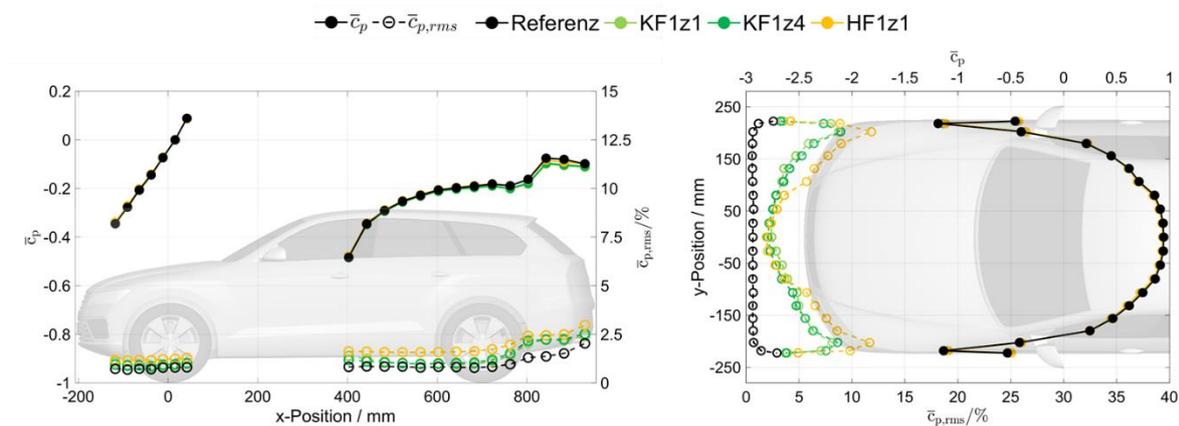


Abbildung 6-8: Mittlere Druckbeiwerte und deren Schwankung entlang des Mittelschnitts der Fahrzeugmotorhaube und des -dachs (links) und im z-Schnitt der Fahrzeugfront (rechts) im Modellwindkanal unter stationärer Anströmung (Referenz) und verschiedenen instationären Anströmungen.

Der Oberflächendruck unter instationärer Anströmung wurden ebenfalls am FAT Golf 1:4 gemessen. Die Signale der Fahrversuche (*KF1z1*, *KF1z4*, *HF1z1*) und die generischen Signale (*SF2.2*, *SF2.5*, *SF2.9*) wurden dafür verwendet. In Abbildung 6-9 sind die Ergebnisse für die Druckmessstellen im Fahrzeugmittelschnitt (links) und an der Fahrzeugfront (rechts) dargestellt. Die Druckbeiwerte zeigen im Mittelschnitt und an der Fahrzeugfront für alle Anströmungen vergleichbare Ergebnisse. Die Schwankungen zeigen das gleiche Verhalten wie beim AeroSUV. Im Seitenbereich der Fahrzeugfront kann bei der Betrachtung der *SF*-Signale festgestellt werden, dass mit zunehmender Intensität des Signals die Schwankung zunimmt. Allerdings ist beim FAT Golf 1:4 ebenfalls festzustellen, dass begründet durch die geringen Schwankungen der Anströmung in x-Richtung die Oberflächendruckschwankungen im Fahrzeugmittelschnitt und im mittleren Bereich der Fahrzeugfront zu gering sind.

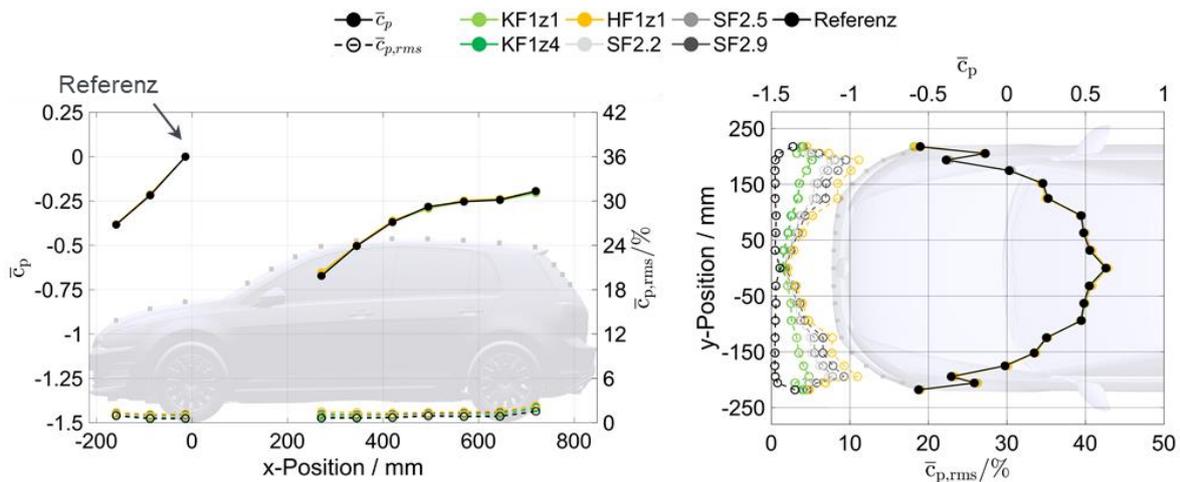


Abbildung 6-9: Mittlere Druckbeiwerte und deren Schwankung entlang des Mittelschnitts der Fahrzeugmotorhaube und des -dachs (links) und in der z-Ebene (55 mm) an der Fahrzeugfront (rechts) im Modellwindkanal unter stationärer Anströmung (*Referenz*) und verschiedenen instationären Anströmungen.

Um die Instationarität der Anströmung in x-Richtung bei Verwendung des FKFS *swing*[®]-Systems zu vergrößern wird eine Kombination aus einem statischen und dynamischen Turbulenzerzeuger untersucht. Verwendet wird der statische Turbulenzerzeuger *TE-300* zusammen mit dem FKFS *swing*[®]-System. In Abbildung 6-10 ist die Kombination der beiden Turbulenzerzeuger dargestellt.

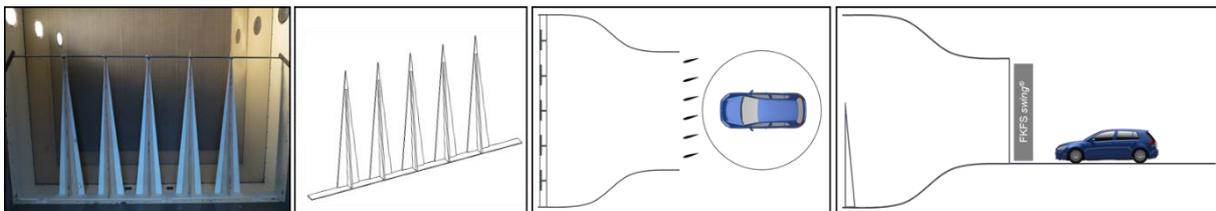


Abbildung 6-10: Fotografie der Turbulenzerzeuger *TE-300* in der Düsenvorkammer des Modellwindkanals, Prinzipskizze der *TE-300* und der Kombination aus *TE-300* und FKFS *swing*[®].

Die turbulenten Größen dieser Kombination unter Verwendung der vorgestellten Signale ist in Abbildung 6-11 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der statische Turbulenzerzeuger *TE-300* der Anströmung in x-Richtung (links) eine Turbulenzintensität zwischen 4,6 und 4,7 %, unabhängig vom Signal aufprägt. Durch die Überlagerung der beiden Systeme wird das integrale Längenmaß auf 0,2 bis 0,4 m reduziert. Neben den Auswirkungen auf die x-Komponente zeigt die Kombination von *TE-300* mit FKFS *swing*[®] auch Veränderungen in der y-Richtung.

Die Turbulenzintensität, wie in Abbildung 6-11 (rechts) dargestellt, steigt im Vergleich zum vorherigen Fall deutlich an. Der Einfluss des FKFS *swing*[®]-Systems wird geringer. Die Differenz zwischen der geringsten und höchsten Turbulenzintensität bei der Anregung ausschließlich mit FKFS *swing*[®] bei den verwendeten Signalen beträgt, wie in Abbildung 6-7 dargestellt, 3,7 Prozentpunkte. Während die Differenz der Turbulenzintensitäten in y-Richtung für die Kombination nur 1,8 Prozentpunkte beträgt. Zusätzlich reduziert die Kombination das integrale Längenmaß.

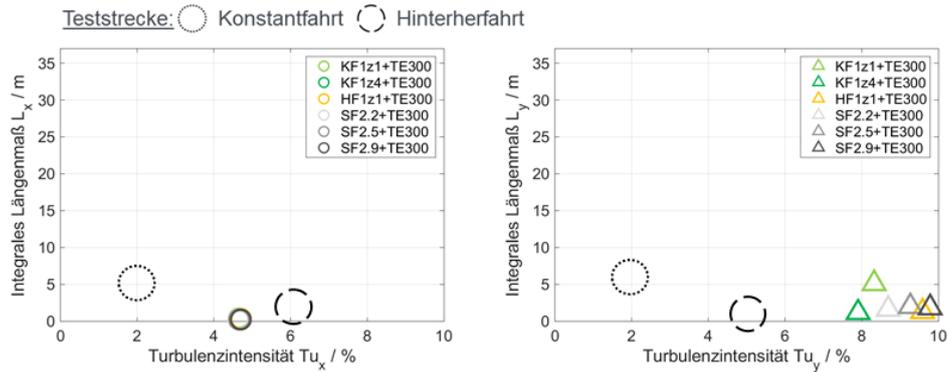


Abbildung 6-11: Turbulenzintensität über integralem Längenmaß in x-Richtung (links) und y-Richtung (rechts) der Kombination aus statischem *TE-300* mit FKFS *swing* unter verschiedenen Signalen in 0,25 m Entfernung vor dem FAT Golf 1:4 bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 50 m/s an der Position 800/0/125 mm; Zielwerte der Fahrversuche sind mit gestrichelten Kreisen dargestellt.

Die Ergebnisse der Oberflächendrücke des FAT Golf 1:4 im Modellwindkanal mit der Kombination aus *TE-300* und FKFS *swing*® für die verschiedenen Signale sind in Abbildung 6-12 dargestellt. Im Mittelschnitt und an der Fahrzeugfront beeinflusst die Kombination der Turbulenzerzeuger den Druckbeiwert im Vergleich zur *Referenz*. Die beschriebene Differenz ist für die verschiedenen Signale jedoch vergleichbar. Hervorgerufen kann der Unterschied des Druckbeiwerts durch verschiedene Anströmgeschwindigkeiten in der z-Ebene werden. Die Konstruktion der Turbulenzerzeuger *TE-300* hat im bodennahen Bereich die größte Versperrung gegenüber der Luftströmung in der Düsenvorkammer. Diese nimmt mit zunehmender Entfernung vom Boden in z-Richtung ab. Die Veränderung der Druckbeiwerte kann bei den Ergebnissen der Oberflächendruckmessungen am AeroSUV unter Verwendung des Turbulenzerzeugers *TE-300* ohne FKFS *swing*®, wie in Abbildung 6-5 dargestellt, ebenfalls beobachtet werden.

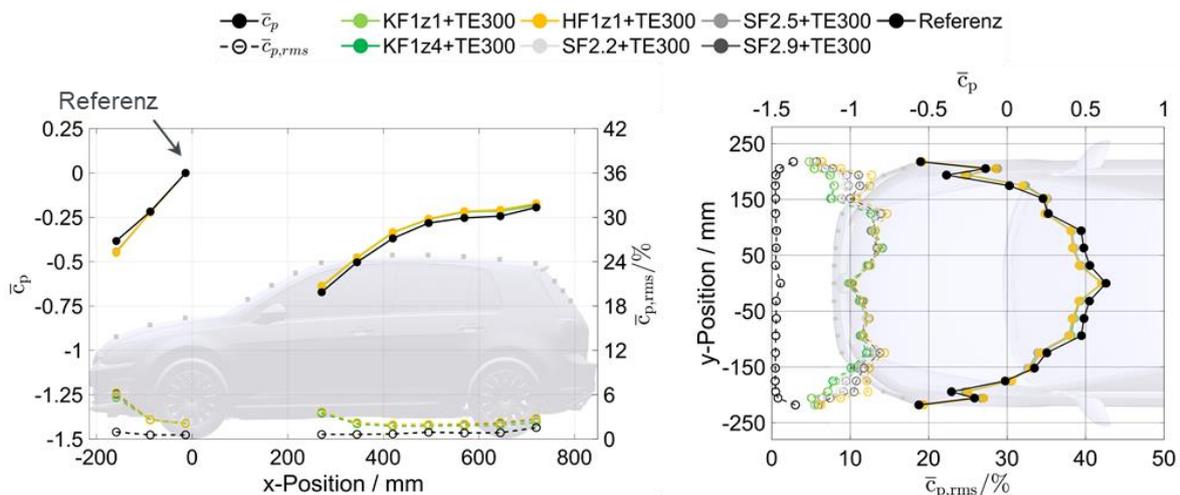


Abbildung 6-12: Mittlere Druckbeiwerte und deren Schwankung entlang des Mittelschnitts der Fahrzeugmotorhaube und des -dachs (links) und in der z-Ebene (55 mm) an der Fahrzeugfront (rechts) im Modellwindkanal unter stationärer Anströmung (*Referenz*) und verschiedenen instationären Anströmungen in Kombination mit dem statischen Turbulenzerzeuger *TE-300* bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 50 m/s.

Die Schwankungen des Oberflächendrucks im Mittelschnitt des FAT Golf 1:4 zeigen ein mit den Fahrversuchen vergleichbaren Verlauf und werden durch FKFS *swing*® unter Verwendung verschiedener

Signalen nur geringfügig beeinflusst. Dies deutet darauf hin, dass durch die Schwankungen der Anströmung in x-Richtung, welche mit dem *TE-300* erzeugt werden, hauptsächlich die Schwankungen im Mittelschnitt beeinflusst werden. Die Absolutwerte der Schwankungen aller Signale sind vergleichbar mit der Konstantfahrt auf der Teststrecke, während für die Simulation der Hinterherfahrt zu geringe Schwankungen auftreten. Dieser Trend wurde bereits anhand der turbulenten Größen in der Anströmung beschrieben.

An der Fahrzeugfront ergeben sich im mittleren Bereich des z-Schnitts für alle Signale vergleichbare Schwankungen. Die Schwankungsgröße ist vergleichbar mit der Hinterherfahrt in 50 m Abstand zum Transporter auf der Teststrecke. Im Randbereich werden durch die verschiedenen Signale, mit zunehmender der Intensität, steigende Schwankungen verursacht. Dies ist der Bereich in dem FKFS *swing*[®] den größten Einfluss auf die Schwankungen der Oberflächendrücke besitzt, siehe Abbildung 6-9.

Mit den vorgestellten Untersuchungsmethoden werden verschiedene Teile, der bei den Fahrversuchen charakterisierte An- und Umströmung, nachgebildet. Die statischen Turbulenzerzeuger, bis auf den *TE-300*, können die turbulenten Größen der Fahrversuche nicht abbilden. Die durch den *TE-300* hervorgerufene Anströmung besitzt eine gesteigerte Instationarität in x-Richtung der Anströmung verringert aber die integralen Längenmaße deutlich. Damit entsteht ein, zu den Fahrversuchen, abweichendes Strömungsbild.

Die Kombination aus FKFS *swing*[®] und dem *TE-300* können die Oberflächendrücke der Fahrversuche in Teilen nachbilden, stellen allerdings eine Mischung der Konstant- und Hinterherfahrt nach und sind somit nicht konsistent. Zusätzlich ist der statische Turbulenzerzeuger in dieser Kombination dominant und prägt dem System eine Charakteristik auf, welche durch das FKFS *swing*[®] nur geringfügig beeinflusst werden kann.

Mit dem FKFS *swing*[®] können die turbulenten Größen in y-Richtung gut abgebildet werden. Hingegen wird bei dieser Turbulenzerzeugung die Instationarität der Anströmung in x-Richtung vernachlässigt. Dadurch zeigen die Schwankungen der Oberflächendrücke Abweichungen zu den Fahrversuchen.

Die Charakteristik der An- und Umströmung kann daher mit den untersuchten Methoden nur teilweise nachgebildet werden. Dennoch bietet die Beherrschbarkeit und die gute Abbildung der angeregten Strömungskomponenten bietet mit dem FKFS *swing*[®]-System eine solide Grundlage für weiterführende Untersuchungen. Diese Methode zur Turbulenzerzeugung ermöglicht die Betrachtung der Auswirkungen von instationärer Anströmung in y-Richtung auf die Fahrzeugaerodynamik. Diese Untersuchung betrachten die Auswirkungen isoliert von Schwankungen der Anströmungsgeschwindigkeit. Aus diesem Grund werden die anschließenden Fahrzeuguntersuchungen unter Verwendung des FKFS *swing*[®]-Systems durchgeführt.

6.1.2 Aerodynamische Charakterisierung des Fahrzeugmodells

Als Grundlage für Untersuchungen im Modellmaßstab ist eine vergleichbare aerodynamische Charakteristik des 1:1 Versuchsfahrzeugs (siehe Abschnitt 4.1.1) und des Fahrzeugmodells (siehe Abschnitt 4.2.1) nötig. Die aerodynamischen Fahrzeugeigenschaften des Versuchsfahrzeugs unter stationärer Anströmung konnten während der Kalibriermessungen im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal (FWK) der Universität Stuttgart ermittelt werden. Zur Ermittlung der in Abbildung 6-13 dargestellten Ergebnisse wurde das Versuchsfahrzeug mit geschlossener Kühlluft gemessen. Die Messungen wurden für Reynolds-Zahlen in der gleichen Größenordnung von $4,23 \cdot 10^6$ im Maßstab 1:1 und $3,32 \cdot 10^6$ im Maßstab 1:4 durchgeführt.

Die Luftkraftbeiwerte des VW Golf VII Versuchsfahrzeugs und des FAT Golf 1:4 Fahrzeugmodells zeigen vergleichbare Werte. Die Abweichungen der Beiwerte zwischen den Maßstäben liegt im Bereich $\leq 0,01$ und die Trends der Auftriebsverteilung werden zuverlässig abgebildet. Die Resultate des Vergleichs der Maßstäbe qualifizieren das FAT Golf 1:4 Fahrzeugmodell als Untersuchungsmodell.

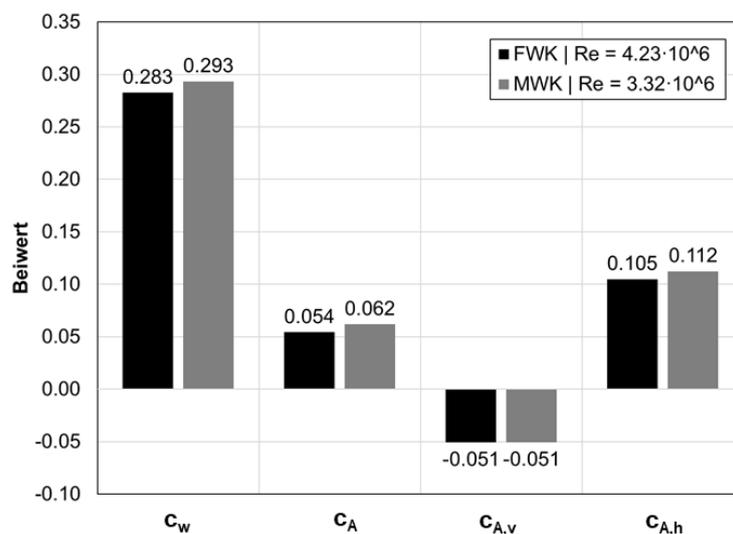


Abbildung 6-13: Vergleich der aerodynamischen Beiwerte des Versuchsfahrzeugs ohne Kühlluft im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal (FWK) und des FAT Golf 1:4 Fahrzeugmodells im Modellwindkanal (MWK).

Der FAT Golf 1:4 besitzt keine Motorraumdurchströmung. Aus diesem Grund ist es mit diesem Modell nicht möglich den Einfluss der Kühlluft auf die Fahrzeugumströmung zu untersuchen. Unter Zuhilfenahme eines, von Volkswagen zur Verfügung gestellten, VW Golf VII (Facelift) Fahrzeugmodells können im Modellmaßstab Untersuchungen mit und ohne Kühlluft durchgeführt werden. Das Fahrzeugmodell von Volkswagen wird im Folgenden VW Golf 1:4 genannt.

Die Unterschiede der Fahrzeugmodelle sind in Abbildung 6-14 dargestellt. Die Unterschiede zwischen FAT Golf 1:4 (links) und VW Golf 1:4 (rechts) sind die Motorraumdurchströmung, die Ausführung der Radaufhängung und die Räder. Es ist zu erkennen, dass beim VW Golf 1:4 die Querlenker und der Hilfsrahmen detailliert umgesetzt sind und das Felgen Design der Leichtmetallfelge Toronto 16" nachempfunden ist. Beim FAT Golf 1:4 hingegen ist, entsprechend dem Versuchsfahrzeug, die Felgen als Stahlfelgen Design in 15" mit Radkappe umgesetzt. Die Außenhaut der Fahrzeugmodelle ist bis auf die Unterschiede zwischen VW Golf VII und dessen Facelift Ausführung vergleichbar. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Hauptunterschiede zwischen den Fahrzeugmodellen (mit geschlossener Kühlluft) im Bereich der Radhäuser sind.

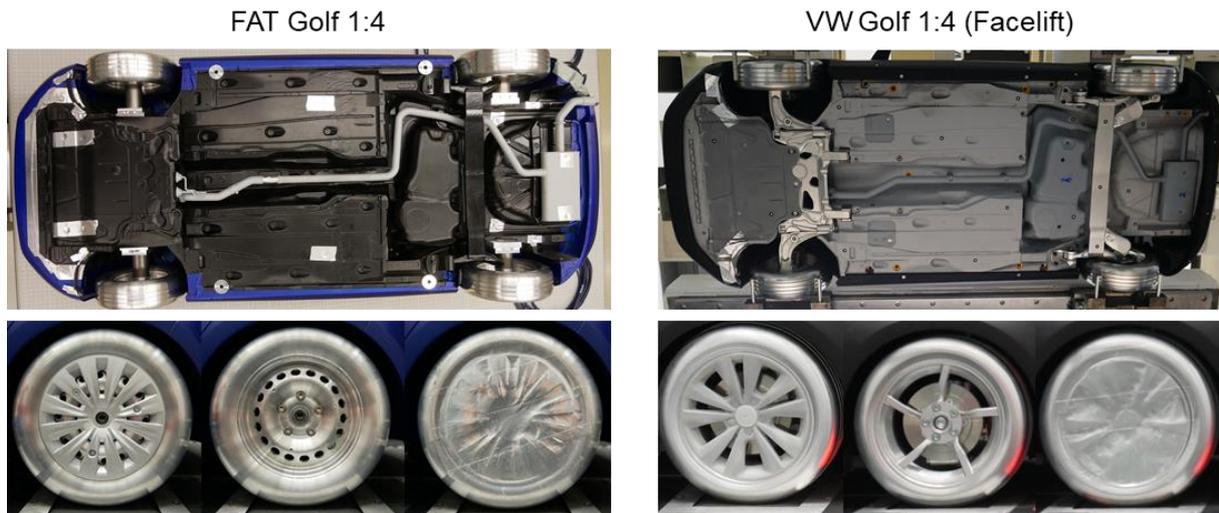


Abbildung 6-14: Detailansicht der Geometrie des FAT Golf (links) und des VW Golf (rechts) im Bereich des Unterbodens und der Räder.

Der Einfluss der Kühlluft auf den Luftwiderstandsbeiwert soll anhand der Auswirkungen verschiedener Geometrievariationen untersucht werden. Detailansichten und Benennung der verschiedenen Varianten der Fahrzeuggeometrie sind in Abbildung 6-15 dargestellt. Als *Baseline* wird die Standard Variante des jeweiligen Fahrzeugmodells jeweils ohne Motorraumdurchströmung verwendet. Alle Variationen der Fahrzeuggeometrie beziehen sich auf die *Baseline* Variante. Als Variation werden verschiedene Abrisskanten mit einer Höhe von 2 mm auf der Außenhaut des Fahrzeugs aufgebracht. In Diagrammen wird die Abrisskante gegebenenfalls mit der Benennung Abriss abgekürzt. Ebenso wurden Bauteile wie Radkappe oder Spiegel entfernt und sowohl die Felgen, als auch die Bremsenkühlung geschlossen.



Abbildung 6-15: Detailansicht und Benennung der Varianten der Fahrzeuggeometrie im Windkanal.

In Abbildung 6-15 ist ebenso die Detailansicht mit Aeroleiste (oben-rechts) abgebildet. Die Aeroleiste ist in der Baseline Variante am FAT Golf 1:4 und VW Golf 1:4 angebracht. Beim VW Golf 1:4 kann diese allerdings nicht entfernt werden, weshalb die Variante ohne Aeroleiste dort nicht darstellbar ist und auf diese Variante am FAT Golf 1:4 erst später eingegangen wird.

Um die Übertragbarkeit der Untersuchungen des VW Golf 1:4 auf den FAT Golf 1:4 zu beurteilen werden unter instationären Anströmbedingungen bei beiden 1:4 Modellen vergleichbare Variationen der Fahrzeuggeometrie bewertet. Die instationäre Anströmung wird unter Verwendung des *HFIz1* Signals mit FKFS *swing*[®] erzeugt. Die Anströmbedingungen besitzen damit eine starke Anregung.

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind in Abbildung 6-16, als Differenzen der Geometrievariationen der Luftwiderstandsbeiwerte zur *Baseline*, dargestellt. Die Resultate des FAT Golf 1:4 und VW Golf 1:4 für die Geometrievariation zeigen gleiche Trends. Die Differenz der normierten Luftwiderstandsbeiwerte beträgt maximal 0,005 zwischen den 1:4 Modellen. Ausgenommen davon ist die Variante ohne Bremsenkühlung. Dies zeigt, dass die Charakteristik des Luftwiderstandsbeiwerts der 1:4 Modelle fast vollständig übereinstimmt und Ergebnisse des VW Golf 1:4 auch Rückschlüsse auf den FAT Golf 1:4 zulassen. Die Ausnahme bei den Untersuchungen stellt die Bremsenkühlung dar und die Übertragbarkeit zwischen den Modellen ist auf Grundlage dieser Ergebnisse nicht gegeben. Der Unterschied kann durch die geometrische Abweichung zwischen den Ausführungen der Bremsenkühlung der Fahrzeugmodelle begründet werden.

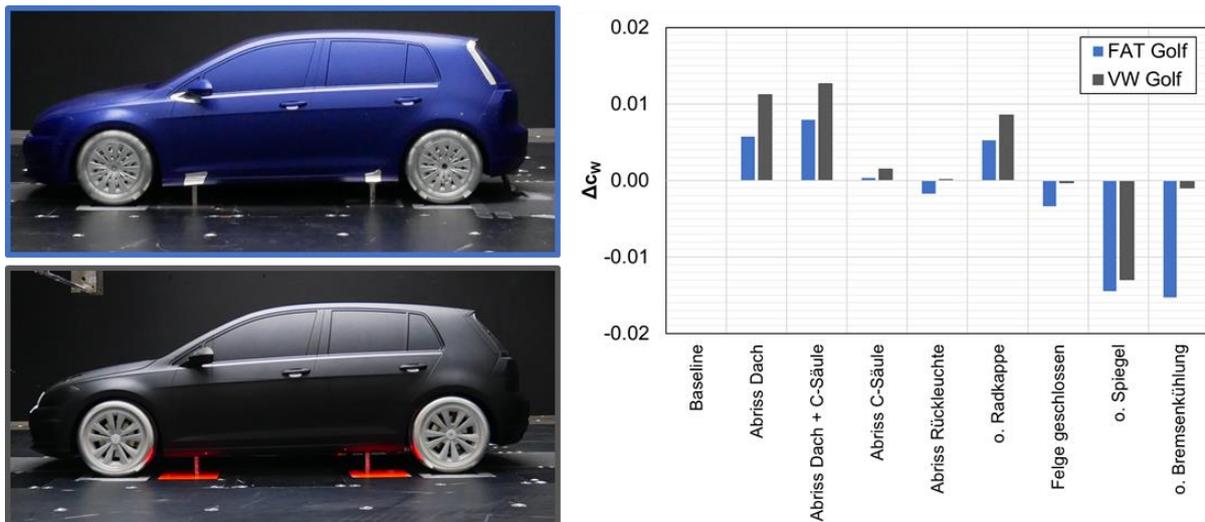


Abbildung 6-16: Vergleich der Luftwiderstandsbeiwerte der Fahrzeugmodelle FAT Golf (oben/blau) und VW Golf (unten/grau) ohne Kühlluft im Modellwindkanal bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 50 m/s mit FKFS *swing*[®] und dem Signal *HF1z1* für verschiedene Variationen der Fahrzeuggeometrie.

Nachdem die Übertragbarkeit der Ergebnisse zwischen den 1:4 Modellen untersucht wurde, wird der Einfluss der Kühlluft unter instationären Anströmbedingungen auf die Variationen der Fahrzeuggeometrie mit dem Fahrzeugmodell VW Golf 1:4 untersucht. Dazu wird ebenfalls das Signal *HF1z1* verwendet. Die Ergebnisse der Luftwiderstandsbeiwerte mit und ohne Kühlluft, normiert auf die jeweilige *Baseline* Variante, sind in Abbildung 6-17 dargestellt. Für die meisten Variationen der Fahrzeuggeometrie ist die Abweichung $<0,002$. Dies trifft für die Varianten der Abrisskanten, *o. Spiegel*, *o. Bremsenkühlung* und *Felgen geschlossen* zu. Die Auswirkungen auf den Luftwiderstandsbeiwert sind unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit für diese Geometrievariationen vernachlässigbar und die Untersuchungsergebnisse sind daher nahezu unabhängig von der Kühlluft.

Lediglich die Variante *o. Radkappe*, bei der die Felge ohne Radkappe verwendet wird (siehe Abbildung 6-14), zeigt eine Abweichung von 0,005 zwischen der Konfiguration mit und ohne Kühlluft. Dies deutet einen Einfluss der Kühlluft auf die aerodynamische Funktionsweise der Radkappen an. Der Bereich der Radhäuser interagiert bei einem Fahrzeug mit Motorraumdurchströmung mit der Kühlluft und kann die Fahrzeugumströmung so beeinflussen, dass Veränderungen im Luftwiderstandsbeiwert festgestellt werden können.

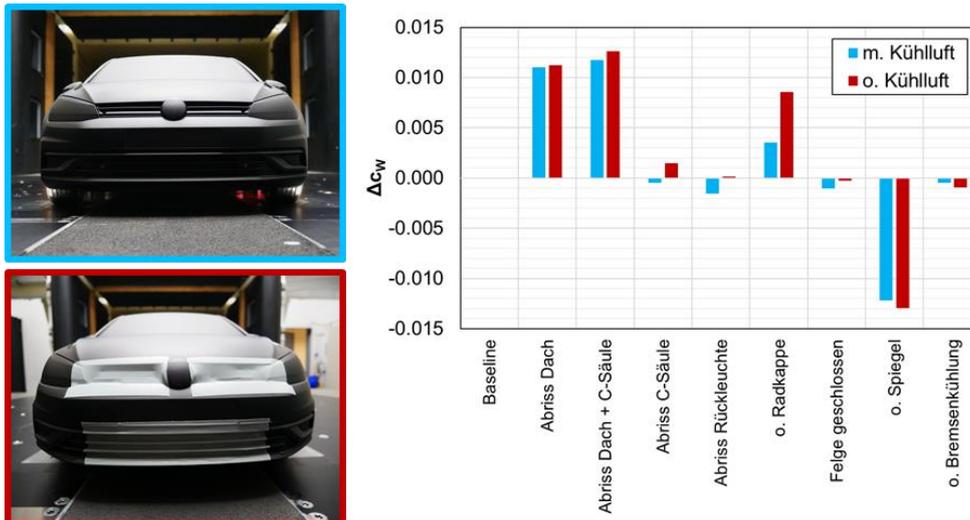


Abbildung 6-17: Einfluss von Kühlluft auf den Luftwiderstandsbeiwert bei Variationen der Fahrzeuggeometrie des VW Golf 1:4 Fahrzeugmodells im Modellwindkanal bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 50 m/s mit FKFS *swing*[®] und dem Signal *HF1z1*.

Aus diesem Grund sollten Untersuchungen verschiedener Felgendesigns, mit deutlichen geometrischen Abweichungen, für verlässliche Ergebnisse immer mit Kühlluft bewertet werden, um aus den Ergebnissen nicht falsche Schlussfolgerungen zu ziehen.

Am FAT Golf 1:4 wird im Folgenden dennoch die Variante ohne Radkappen untersucht, da es hier vorrangig um einen prinzipiellen Einfluss auf die instationären Effekte geht und nicht um den absoluten Einfluss der Felgen auf der Straße, wurde diese Variante auch ohne die Kühlluft am FAT Golf 1:4 beibehalten.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das FAT Golf 1:4 Fahrzeugmodell für die Untersuchungen im Modellwindkanal geeignet ist. Die aerodynamische Charakteristik ist vergleichbar mit dem Versuchsfahrzeug. Auf den Luftwiderstandsbeiwert, normiert auf die Variante Baseline, hat die fehlende Motorraumdurchströmung nur geringe Auswirkungen.

6.1.3 Auswirkungen instationärer Anströmbedingungen auf den Druckgradienten im Windkanal

In einem Windkanal tragen verschiedene Faktoren, Interferenzeffekte genannt, dazu bei, dass die Ergebnisse der Luftwiderstandsbeiwerte korrigiert werden müssen. Einer dieser Interferenzeffekte ist der Gradient des statischen Drucks in der Messstrecke entlang der x-Achse. Wie in Kapitel 4.2.1 beschrieben wird aktuell die sogenannte *Two Measurement Correction* [51] verwendet um die Ergebnisse von Windkanalmessungen zu korrigieren. In dieser Korrekturmethode werden neben dem Druckgradienten auch die Interferenzeffekte der Strahlaufweitung, der Düsenversperrung und der Kollektorblockierung korrigiert.

Die unter stationären Anströmbedingungen ermittelten Druckgradienten haben allerdings für instationäre Anströmung keine Gültigkeit. In Abbildung 6-18 sind beispielhafte, gemittelte Druckgradienten für stationäre und instationäre Anströmbedingungen dargestellt. Diese zeigen den statischen Druck in x-Richtung in der Mitte der Messstrecke bei $z = 250$ mm. Es ist zu erkennen, dass der gemittelte Druckgradient *ohne swing* für stationäre Anströmbedingungen, sich von den Druckgradienten im instationären Strömungsfeld unterscheidet. Für die Signale *KF1z1* und *KF1z4* mit geringer Anregung sind die Abweichungen im hinteren Bereich der Messstrecke bei 0,003 und 0,006. Für das Signal *HF1z1* zeigt sich eine maximale Abweichung von 0,009. Die Abweichungen im Druckgradienten werden bei der Korrektur

der Interferenzeffekte zwischen Fahrzeugfront und -heck mit gleichen Zahlenwerten im Luftwiderstandsbeiwert berücksichtigt.

Die *Two Measurement Correction* bildet anhand der statischen Druckgradienten, an zwei während der Korrektur iterierten x-Positionen an Fahrzeugfront und -heck, eine Differenz der Druckkoeffizienten und verrechnet diese in der Korrektur dem Luftwiderstandsbeiwert. Um zuverlässige Luftwiderstandsbeiwerte zu ermitteln ist es daher wichtig die Korrektur der Interferenzeffekte durchzuführen und den vorliegenden Druckgradienten des instationären Strömungsfeldes zu verwenden.

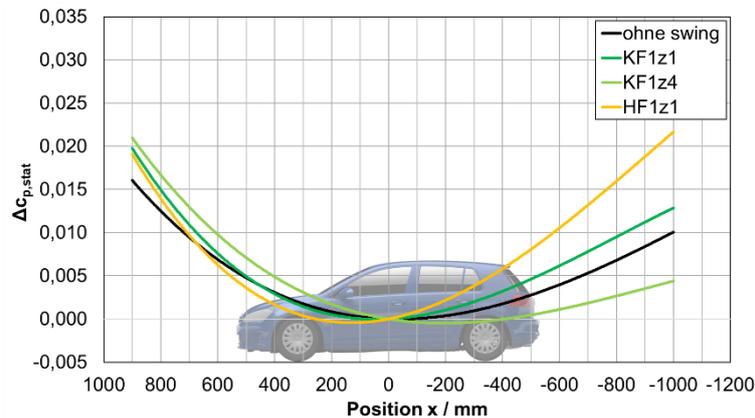


Abbildung 6-18: Beispielhafte Darstellung des Druckgradienten in der Messstrecke des Modellwindkanals ohne FKFS *swing*® und mit FKFS *swing*® und für die Signale aus den Fahrversuchen auf der Teststrecke.

Die Auswirkungen der Korrektur auf den Luftwiderstandsbeiwert ist in Abbildung 6-19 dargestellt. Die Ergebnisse für die generischen Signale der Straßenfahrt sind auf den stationären Luftwiderstandsbeiwert normiert. Mit zunehmender Signalstärke, bzw. Turbulenzgrad in y-Richtung, nimmt der Luftwiderstandsbeiwert der Rohdaten geringfügig ab, während die korrigierten Messergebnisse einen umgekehrten und deutlich ausgeprägten Trend zeigen. Für das Signal *SF2.9* ist der Unterschied zwischen Rohdaten und korrigierten Messwerten mit 0,006 maximal.

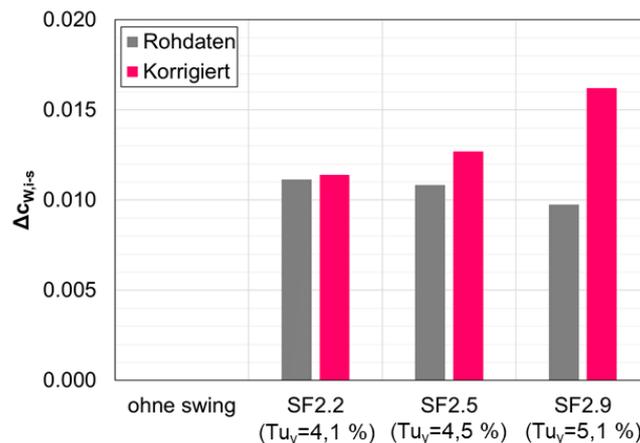


Abbildung 6-19: Einfluss der Korrektur von Windkanalinterferenzeffekten auf den Luftwiderstandsbeiwert der generischen instationären Anströmung, normiert auf die stationäre Anströmung (ohne swing) bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 50 m/s.

Die Korrektur der Messergebnisse hat einen erheblichen Einfluss auf die Qualität der Ergebnisse und ist daher ein wichtiger Bestandteil der Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwerts. Die Korrektur von Interferenzeffekten im Windkanal hat nicht nur auf den absoluten Luftwiderstandsbeiwert einen Einfluss, sondern ebenfalls auf die Betrachtung von Luftwiderstandsbeiwerten verschiedener Geometrievariation

unter gleichen Anströmbedingungen. Daher müssen die Interferenzeffekte im Windkanal bei allen Messergebnissen korrigiert werden.

6.1.4 Auswirkungen instationärer Anströmungen auf die Fahrzeugaerodynamik

Der Unterschied der Fahrzeugaerodynamik unter stationärer und instationärer Anströmung wird in diesem Abschnitt diskutiert. Dabei soll zum einen die Frage beantwortet werden, ob verschiedene Fahrzeugkonfigurationen bei instationärer Anströmung im Vergleich zur stationären Anströmung unterschiedlich reagieren und zum anderen untersucht werden, ob verschiedene Anregungen zu unterschiedlichen Ergebnissen führen.

Die in Abschnitt 6.1.2 beschriebenen Variationen der Fahrzeuggeometrie sind dazu einerseits für eine stationäre Anströmung (*ohne swing*) und andererseits für verschiedene instationäre Anströmungen untersucht worden. Die instationäre Anströmung wird mit den, in Abschnitt 6.1.1 vorgestellten, Signalen erzeugt. Die auf die Variante *Baseline* normierten Luftwiderstandsbeiwerte Δc_w unter stationären und instationären Anströmbedingungen sind in Abbildung 6-20 dargestellt. Die Ergebnisse der instationären Anströmung sind zum einen für die Signale aus den Fahrversuchen auf der Teststrecke (links) und zum anderen für die generischen Signale (rechts) dargestellt.

Die Differenz zwischen den normierten Luftwiderstandsbeiwerten unter stationärer und instationärer Anströmung beschreibt den Einfluss der instationären Anströmung auf den Luftwiderstandsbeiwert einer Geometrievariation. Diese Differenz ist beispielhaft für eine Konfiguration als $\Delta\Delta c_w$ in den Diagrammen eingezeichnet. Für den untersuchten Parameterraum der Geometrievariationen und instationären Anströmungen liegt $\Delta\Delta c_w$ im Bereich von 0,003 bis -0,010.

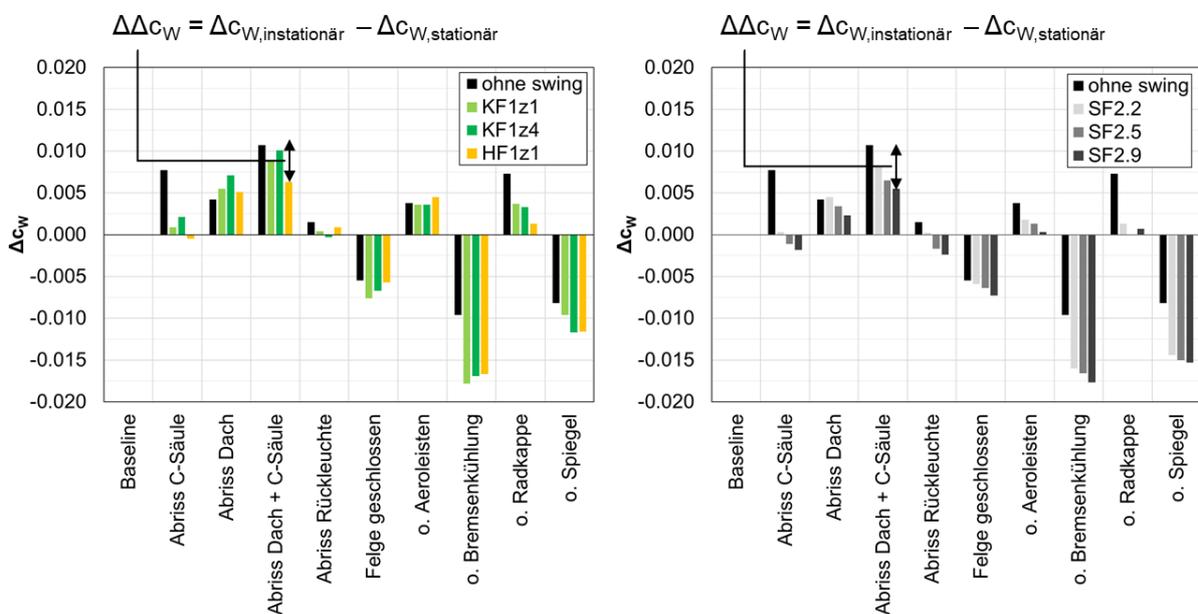


Abbildung 6-20: Auswirkungen der instationären Anströmung auf die Luftwiderstandsbeiwerte der Variation der Fahrzeuggeometrie für die Signale aus den Fahrversuchen auf der Teststrecke (links) und die generischen Signale (rechts) bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 50 m/s.

Für die Ergebnisse unter Verwendung der Signale der Fahrversuche auf der Teststrecke zeigt sich ein variierendes Verhalten, während die Ergebnisse der generischen Signale mit zunehmender Signalstärke geringere Messwerte verursachen. Jedoch zeigen die Ergebnisse der Messungen mit den verschiedenen Signalen für die Variationen der Fahrzeuggeometrie die gleichen Trends und vergleichbare Werte.

Der Einfluss der instationären Anströmbedingungen auf den Luftwiderstand des Fahrzeugmodells ist sehr gut zu erkennen. Für die Variante *o. Bremsenkühlung* verbessert sich der normierte Luftwiderstandsbeiwert, bezogen auf die Variante *Baseline*, im instationären Strömungsfeld deutlich stärker als für stationäre Anströmung. Hingegen vergrößert sich der normierte Luftwiderstandsbeiwert für die Variante *o. Radkappe* für stationäre Messungen in einem größeren Maß als unter instationärer Anströmung. Es kann daher festgestellt werden, dass die instationäre Anströmung die Wirkweisen der aerodynamischen Bauteile verändert.

Während für die stationäre Anströmung für beide Maßnahmen eine vergleichbare Größenordnung des Einflusses auf den Luftwiderstand ermittelt wird, verändert sich die Sachlage für Messergebnisse mit instationärer Anströmung. Bei der Entwicklung des Fahrzeugmodells unter aerodynamischen Gesichtspunkten unter Berücksichtigung der instationären Anströmung hätte für die genannten Beispiele die Entfernung der Bremsenkühlung einen höheren Stellenwert als der Einsatz von Radkappen.

Für den Entwickler der Fahrzeugaerodynamik ist es daher zukünftig nicht ausschließlich entscheidend, das Fahrzeug unter stationären Strömungsbedingungen zu entwickeln. Ergänzend ist ebenfalls die aerodynamische Charakteristik eines Fahrzeugs unter instationären Anströmbedingungen der Straßenfahrt zu untersuchen.

Neben der Bewertung der Auswirkungen von Geometrievariationen im stationären und instationären Strömungsfeld auf den Luftwiderstandsbeiwert soll ebenfalls der Einfluss der instationären Anströmung auf den absoluten Luftwiderstandsbeiwert untersucht werden. Die bei der Straßenfahrt vorgefundene instationäre Anströmung kann in zwei Bereiche unterschieden werden. Zum einen erfährt das Fahrzeug im instationären Strömungsfeld eine Schräganströmung und zum anderen tritt die Schräganströmung dynamisch auf. Ersteres kann auch durch quasistationäre Messungen mittels der *wind averaged drag* Methode bewertet werden. Ergeben sowohl die quasi-stationäre Methode und die dynamische Messung das gleiche Ergebnis, dann sind die instationären Effekte vernachlässigbar.

Mit der *wind averaged drag* Methode wird die instationäre Anströmung die ein Fahrzeug erfährt mit stationären Messungen nachgestellt. Dabei werden die Luftwiderstandsbeiwerte unter stationären Schräganströmungen einer instationären Anströmung ermittelt und entsprechend ihrer Häufigkeit gewichtet. Weitere Informationen zur Berechnung *des wind averaged drag* sind in Kapitel 2.2 zu finden. Für den Vergleich der Methoden wird der *wind averaged drag* entsprechend der Gewichtung der Strömungswinkel der verschiedenen generischen Signale ermittelt. Für jedes Signal resultiert ein quasistationärer Luftwiderstandsbeiwert.

Die Messergebnisse der instationären Luftwiderstandsbeiwerte der generischen Signale im Modellwindkanal sind in Abbildung 6-21 dargestellt. Diese sind auf den stationären Luftwiderstandsbeiwert der *Baseline* normiert. Sowohl die Auswertungen mit Hilfe der *wind averaged drag*-Methode, als auch die instationären Messungen zeigen mit zunehmender Intensität des Signals ansteigende Luftwiderstandsbeiwerte. Die Anstiege bei der *wind averaged drag*-Methode zwischen dem stationären Zustand und den verschiedenen Signalen der Straßenfahrt liegt zwischen 0,006 und 0,008 im Luftwiderstand. Weiterhin zeigten sich nur geringe Unterschiede zwischen den verschiedenen generischen Signalen bei der Anwendung der *wind averaged drag*-Methode.

Bei der instationären Anregung liegt die Differenz zum stationären Zustand mit 0,011 bis 0,016 deutlich höher. Der Einfluss der instationären Anregung ist im Vergleich zum quasi-stationären *wind averaged drag* damit bis zu doppelt so groß und zeigt mit stärker werdendem Signal auch einen deutlicheren Anstieg des Luftwiderstandsbeiwerts.

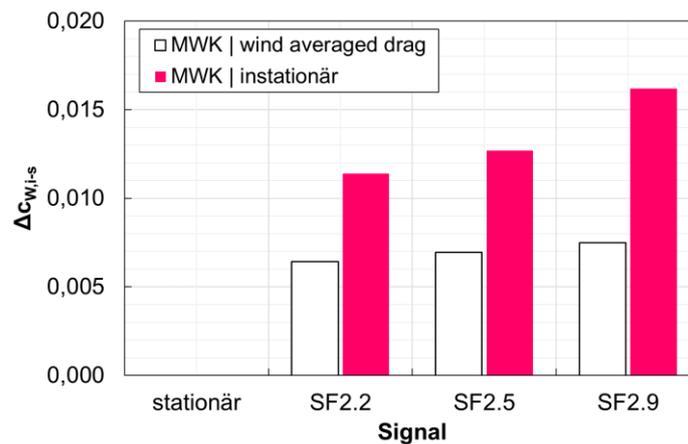


Abbildung 6-21: Vergleich der Luftwiderstandsbeiwerte mit stationärer (MWK | *wind averaged drag*) und instationärer Anströmung der generischen Signale im Modellwindkanal (MWK | instationär) normiert auf die Luftwiderstandsbeiwerte der stationären Anströmung bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 50 m/s.

Die Unterschiede der instationären und stationär gewichteten Schräganströmung zeigen, dass neben dem Anstieg des Luftwiderstands bei Schräganströmung auch zusätzliche instationäre Effekte den Luftwiderstandsbeiwert beeinflussen. Die reine Betrachtung des Luftwiderstands mit quasi-stationären Methoden ist damit also nicht ausreichend.

Zusammenfassend zeigen die Messungen am vereinfachten Fahrzeugmodell im Modellwindkanal der Universität Stuttgart, dass die instationäre Anströmung, die bei der Straßenfahrt vorliegt, den Luftwiderstandsbeiwert eines Fahrzeugs in Abhängigkeit von der Intensität der Instationarität beeinflusst. Dabei steigt mit zunehmender Intensität der Luftwiderstandsbeiwert. Darüber hinaus verändert sich die Wirkweise von aerodynamischen Maßnahmen zur Beeinflussung des Luftwiderstandsbeiwerts im instationären Strömungsfeld. Besonders sensitiv reagierten die geometrischen Veränderungen der Abrisskanten an der C-Säule, Bremsenkühlung, Radkappen und Spiegel. Dies deutet darauf hin, dass sich die Entwicklung von aerodynamischen Bauteilen unter Berücksichtigung von instationären Strömungsbedingungen verändert.

6.2 Messungen im 1:1 Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal der Universität Stuttgart

Die Auswirkungen der Instationären Anströmung auf die Fahrzeugaerodynamik wurde neben den vorgestellten Untersuchungen im 1:4 Modellmaßstab ebenfalls mit dem 1:1 Versuchsfahrzeug, das auch bereits für die Straßenmessungen verwendet wurde, im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal der Universität Stuttgart untersucht.

Die Randbedingungen der Fahrversuche wurden im Windkanal nachgestellt. Die Standhöhen sind äquivalent zu den Messergebnissen der Fahrversuche eingestellt worden. Im Windkanal wurden die Räder der Fahrversuche verwendet und der Reifendruck vor den Messungen gemäß der Vorgabe des Fahrzeugherstellers, wie auch bei den Fahrversuchen, angepasst. Bei Messungen der Fahrzeugkonfiguration ohne Kühlluft wurden alle Lufteinlässe an der gesamten Frontstoßstange geschlossen und so sichergestellt, dass keine Luftströmung durch den Kühlergrill in den Motorraum auftritt.

Wie im Modellmaßstab kam im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal das FKFS *swing*[®]-System zum Einsatz, mit dem der Strömung unterschiedliche instationäre Signale aufgeprägt wurden. Durch die Verwendung desselben Versuchsfahrzeugs ist der direkte Vergleich mit den Straßenmessungen, insbesondere bei der Betrachtung der Oberflächendrücke möglich. Zusätzlich können im Windkanal die

Luftwiderstandsbeiwerte verschiedener Variationen der Fahrzeuggeometrie und verschiedenen Signalen ermittelt werden. Diese werden im Folgenden auch mit den Ergebnissen im Modellmaßstab verglichen, um so zeigen zu können, ob die Untersuchung der instationären Strömung um das Fahrzeug auch im Modellmaßstab zuverlässig ist.

6.2.1 Auswirkungen der Kühlluft auf die Oberflächendruckbeiwerte

Die Auswirkungen der Kühlluft auf den instationären Luftwiderstand wurden im Abschnitt 6.1.2 am 1:4 Fahrzeugmodell betrachtet. Im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal kann darüber hinaus am 1:1 Versuchsfahrzeug untersucht werden, wie sich der Druckbeiwerte auf der Fahrzeugoberfläche unter instationärer Anströmung mit und ohne Kühlluft verhalten. Die Oberflächendrücke des Versuchsfahrzeugs sind im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal unter Verwendung des FKFS *swing*[®]-Systems bei verschiedenen instationären Signalen erfasst worden. Die Ergebnisse sollen nun Exemplarisch für eines der Signale, das in Abschnitt 6.1.1 beschriebene Signal *SF2.9*, betrachtet werden. Hierfür sind im Mittelschnitt des VW Golf in Abbildung 6-22 und für z-Schnitte an der Fahrzeugfront und -heck in Abbildung 6-23 die Druckbeiwerte und deren Schwankungen dargestellt.

Die Ergebnisse der Untersuchungen der Oberflächendruckbeiwerte und deren Schwankungen wurden im Modellmaßstab in Abschnitt 6.1.1 vorgestellt. Sowohl im Modellwindkanal als auch im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal wird die instationäre Anströmung mit FKFS *swing*[®] erzeugt. Die mit der instationären Anströmung resultierende Charakteristik der Druckbeiwerte und deren Schwankungen ist für beide Untersuchungsumgebungen vergleichbar.

Die Druckbeiwerte der Varianten mit und ohne Kühlluft unterscheiden sich im Mittelschnitt der Fahrzeugebene besonders an der Fahrzeugfront. Im vorderen Bereich der Motorhaube können mit Kühlluftgesteigerte Druckbeiwerte im Vergleich zu den Ergebnissen ohne Kühlluft festgestellt werden. Im Bereich des Fahrzeugdachs sind die Druckbeiwerte vergleichbar. Die Schwankungen der Druckbeiwerte sind im gesamten Mittelschnitt für beide Kühlluft Varianten vergleichbar und es zeigen sich sehr geringe Unterschiede im Bereich $\leq 0,1\%$.

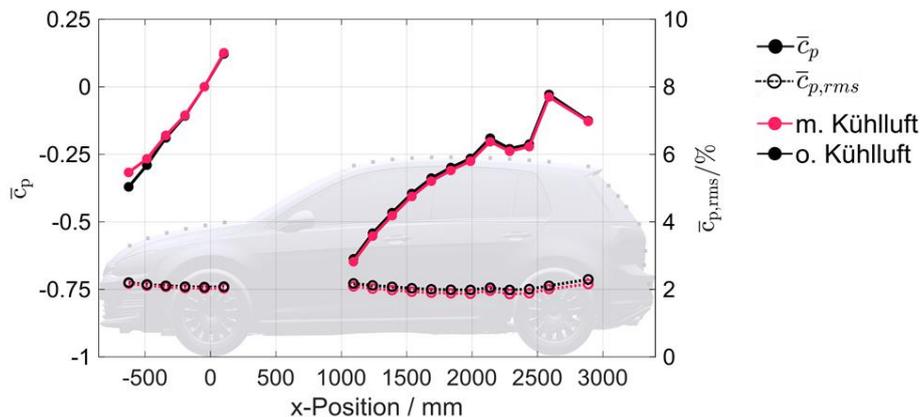


Abbildung 6-22: Einfluss der Kühlluft auf die Druckbeiwerte und deren Schwankungen im Mittelschnitt des Versuchsfahrzeugs im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 27,8 m/s mit FKFS *swing*[®] und dem Signal *SF2.9*.

Neben dem Mittelschnitt werden ebenfalls die z-Schnitte an Fahrzeugfront ($z = 220$ mm) und -heck ($z = 440$ mm) betrachtet. Die z-Koordinaten sind auf den Fahrzeugursprung, Mittelpunkt der Vorderachse, referenziert. An der Fahrzeugfront sind die Druckbeiwerte mit Kühlluft tendenziell höher als ohne Kühlluft. Dieser Trend macht sich besonders im Randbereich bemerkbar. Zur Fahrzeugmitte hin nimmt die Differenz zwischen der Variante mit und ohne Kühlluft ab und wird vereinzelt sogar negativ. Der Verlauf der Druckbeiwerte bleibt jedoch für beide Varianten erhalten.

Mit Kühlluft sinkt der Druckbeiwert am Fahrzeugheck im Randbereich verglichen zu den Werten ohne Kühlluft. Auf der Basisfläche zeigt sich ein umgekehrter Trend. Der Verlauf der Druckbeiwerte ist jedoch für beide Varianten vergleichbar und es können keine Ausreiser identifiziert werden.

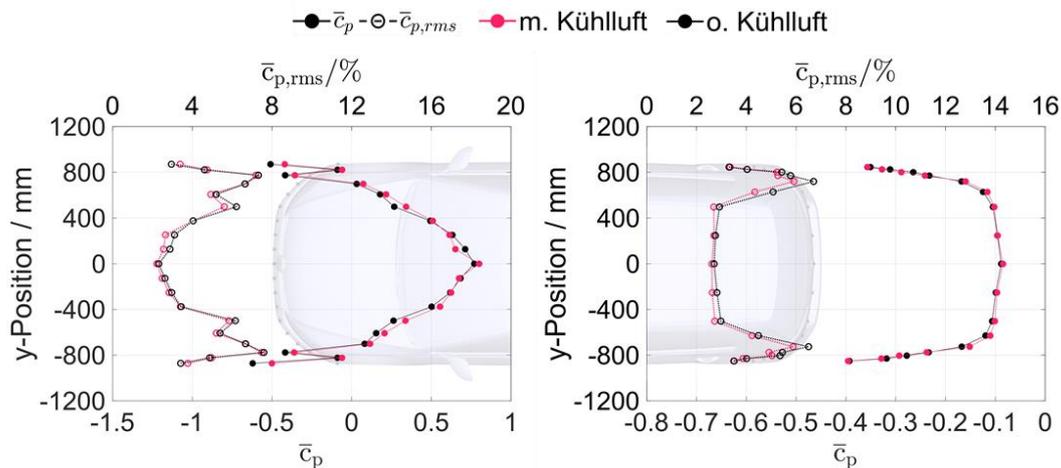


Abbildung 6-23: Einfluss der Kühlluft auf die Druckbeiwerte und deren Schwankungen für den z-Schnitt (220 mm) an der Fahrzeugfront (links) und den z-Schnitt (440 mm) am Fahrzeugheck (rechts) des Versuchsfahrzeugs im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 27,8 m/s mit FKFS *swing*[®] und dem Signal SF2.9.

Bei der Betrachtung der in Abbildung 6-23 dargestellten Schwankungen der Druckbeiwerte ist an der Fahrzeugfront eine geringe Differenz im Bereich $\leq 0,6\%$ zwischen mit und ohne Kühlluft festzustellen. Am Fahrzeugheck ist der Unterschied zwischen den Varianten größer als an der Fahrzeugfront. Mit Abweichungen im Bereich $< 0,8\%$ ist diese allerdings ebenfalls gering. Die Verläufe der Oberflächendruckschwankungen sind für die Varianten mit und ohne Kühlluft vergleichbar. Aus diesem Grund hat die Kühlluft vernachlässigbaren Einfluss auf die Schwankungen der Oberflächendrücke.

6.2.2 Auswirkungen instationärer Anströmungen auf die Fahrzeugaerodynamik

Die Ergebnisse der Messungen im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal werden im Folgenden mit denen der Modellwindkanalmessungen verglichen. Dabei werden die Auswirkungen der stationären und instationären Anströmungen auf die Fahrzeugaerodynamik zwischen den Maßstäben verglichen.

Die Ergebnisse der stationären Anströmbedingungen *ohne swing* sind in Abbildung 6-24 dargestellt. Die Trends der Luftwiderstandsbeiwerte der verglichenen Geometrievariationen stimmen überein. Jedoch zeigen diese nicht die gleichen Werte und Abweichungen zwischen den Maßstäben können identifiziert werden. Die Differenzen zwischen den Maßstäben können durch verschiedene Ursachen hervorgerufen werden. So können beispielsweise die Vereinfachungen des Fahrzeugmodells im Vergleich zum 1:1 Versuchsfahrzeug, im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal (FWK), Abweichungen verursachen. Zusätzlich Unterschiede durch ungleich angebrachte Abrisskanten hervorgerufen werden. Die Höhe der Abrisskanten beträgt 2 mm im Maßstab 1:4 und 8 mm im Maßstab 1:1.

Die größten Abweichungen treten für die *Abrisskante Dach*, *Abrisskante Dach+C-Säule* und *o. Bremsenkühlung* auf. Diese Bereiche sind von den identifizierten Einflussparametern betroffen. Trotzdem bieten die Ergebnisse eine gute Vergleichsgrundlage für den Vergleich mit instationären Anströmbedingungen. Denn die Variationen der Fahrzeuggeometrie bleiben im jeweiligen Maßstab sowohl unter stationären, als auch unter instationären Anströmbedingungen geometrisch nahezu unverändert.

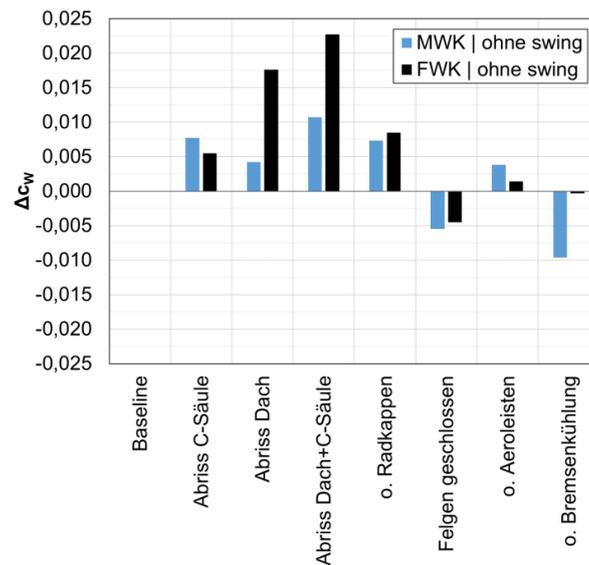


Abbildung 6-24: Vergleich der Luftwiderstandsbeiwerte der Variation der Fahrzeuggeometrie ohne swing im Maßstab 1:1 (FWK) und Maßstab 1:4 (MWK) bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 27,8 m/s.

Folgend auf den Vergleich der Maßstäbe unter stationären Anströmbedingungen werden diese unter instationären Anströmbedingungen betrachtet. Um bei den instationären Anströmbedingungen vergleichbare physikalische Zustände zu erhalten sollen die Signale in beiden Windkanälen die gleiche Strouhal-Zahl aufweisen. In Abschnitt 6.1.1 wurde, aufgrund der Maßstäbe (1:1 und 1:4) und den Anströmgeschwindigkeiten (27,8 m/s und 50,0 m/s) der Faktor 7,2 eingeführt. Um diesen Faktor müssen die Signale vom Maßstab 1:1 zum Maßstab 1:4 beschleunigt werden.

Aufgrund der Systemgrenzen des FKFS *swing*[®]-Systems im Modellwindkanal ist eine Beschleunigung nur für das *KF1z1* Signal möglich, da bei den übrigen Signalen die Frequenzen und Amplituden zu groß werden. Das *KF1z1* Signal wurde während der freien Fahrt auf der Teststrecke erfasst. Das beschleunigte Signal wurde bereits als *KF1z4* vorgestellt und im Modellwindkanal eingesetzt. In Abbildung 6-25 (links) sind die Ergebnisse der Signale der *Konstantfahrt* (*KF*) dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Unterschied zwischen den Signalen *KF1z1* und *KF1z4* geringer ist als die Abweichung zwischen MWK und FWK. Der Unterschied zwischen den Maßstäben hat daher einen größeren Einfluss auf die Ergebnisse als die Skalierung der Signale. Es konnte nur ein Signal im Maßstab 1:4 (MWK) beschleunigt werden und daher nur der dargelegte Vergleich betrachtet werden.

Neben den Resultaten der *KF* Signale sind in Abbildung 6-25 (rechts) die Ergebnisse des *HF1z1* Signals dargestellt. Im Vergleich zu den *KF* Signalen nimmt die Abweichung zwischen MWK und FWK ab. Die Trends stimmen auch für das *HF* Signal in beiden Maßstäben überein.

Auf den Vergleich der Ergebnisse der beiden Maßstäbe folgt der Vergleich der Luftwiderstandsbeiwerte unter stationären und instationären Anströmbedingungen im Maßstab 1:1 (FWK). Die Ergebnisse der Geometrievariationen unter den *KF* Signalen (links) und *SF* Signalen (rechts) sind in Abbildung 6-26 dargestellt.

Der Einfluss der instationären Anströmung kann im Maßstab 1:1 ebenfalls identifiziert werden. Besonders für die Variante o. Radspoiler VA zeigt die instationäre Anströmung aller Signale eine Abweichung zur stationären Anströmung. Die Abrisskanten zeigen allerdings im 1:1 Maßstab geringere Differenzen zwischen stationärer und instationärer Anströmung als im Modellmaßstab. Für Signale mit geringer Intensität (*KF1z1* und *SF2.2*) sind besonders die Varianten *Felge geschlossen* und *o. Bremsenkühlung* sensitiv. Bei instationären Anströmbedingungen mit mittlerer Intensität (*SF2.5*) sind die Abweichungen

zur stationären Messung für die Geometrievariationen *o. Radkappe* und *o. Radspoiler VA+HA* am größten. Die Varianten bei denen die Radspoiler variiert werden zeigt für hohe Intensitäten der instationären Anströmbedingungen (*HF1z1* und *SF2.9*) den größten Einfluss auf den Luftwiderstandsbeiwert.

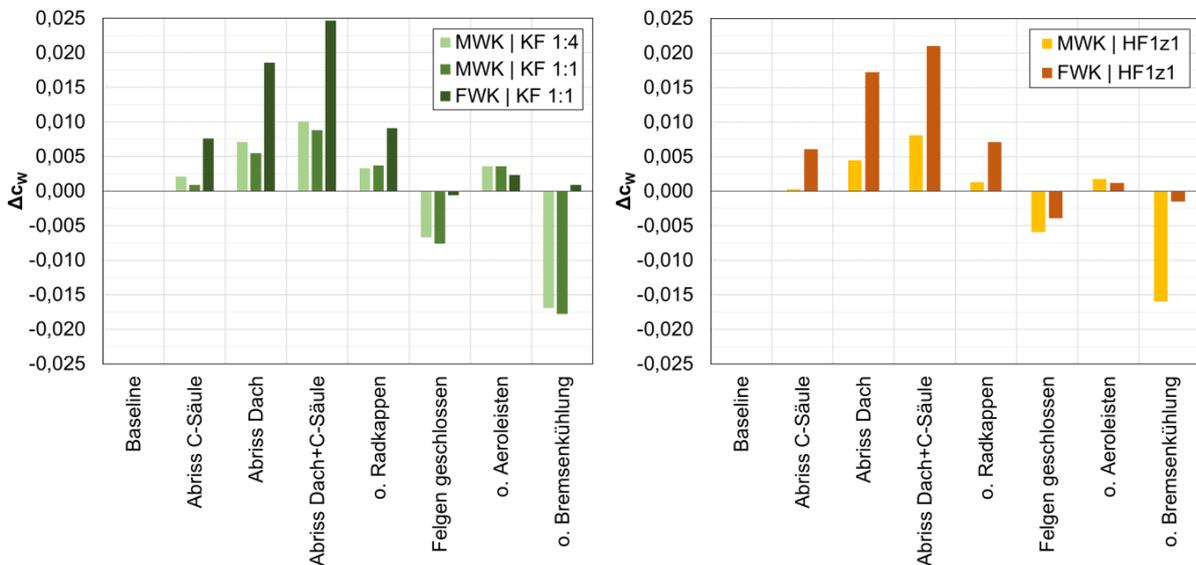


Abbildung 6-25: Vergleich der Auswirkungen von instationärer Anströmung auf die Luftwiderstandsbeiwerte der Variation der Fahrzeuggeometrie für das KF Signal im Maßstab 1:1 (FWK) und Maßstab 1:4 (MWK) original und skaliert (links) und das HF Signal im Maßstab 1:1 (FWK) und Maßstab 1:4 (MWK) original (rechts) bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 27,8 m/s.

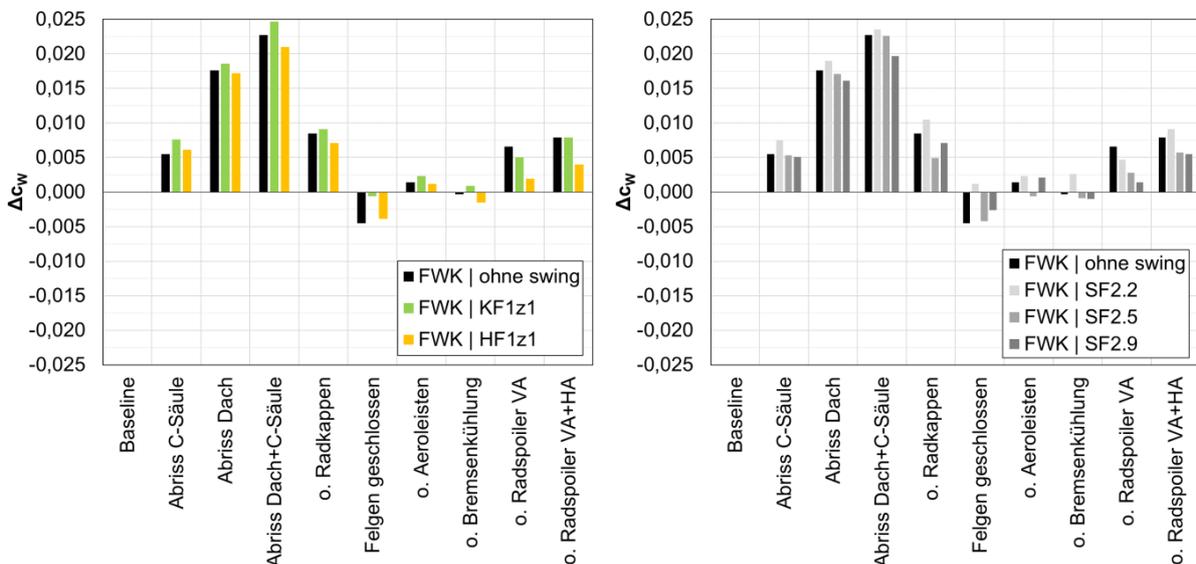


Abbildung 6-26: Vergleich der Auswirkungen von instationärer Anströmung auf die Luftwiderstandsbeiwerte der Variation der Fahrzeuggeometrie im Maßstab 1:1 für die Signale aus den Fahrversuchen auf der Teststrecke (links) und der generischen Signale zur Nachstellung der Straßenfahrt (rechts) bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 27,8 m/s.

Neben der Betrachtung von Variationen der Fahrzeuggeometrie ist im Maßstab 1:1 ebenfalls der Einfluss von instationärer Anströmung auf den Luftwiderstandsbeiwert betrachtet worden. Der Einfluss von instationärer Anströmung mit verschiedenen Intensitäten auf den Luftwiderstandsbeiwert wurde ebenfalls im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal, wie im Modellwindkanal, mit den generischen Signalen untersucht. In Abbildung 6-27 sind die Ergebnisse des Modellwindkanals (MWK) und Aeroakustik-Fahrzeugwindkanals (FWK) dargestellt.

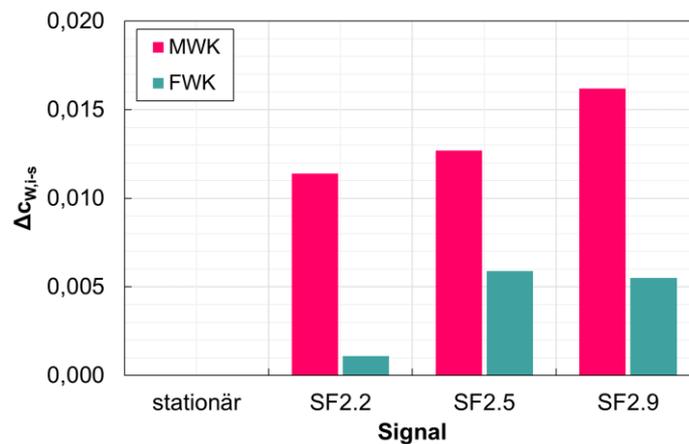


Abbildung 6-27: Vergleich der Luftwiderstandsbeiwerte mit instationärer Anströmung der generischen Signale im Modellwindkanal (MWK) bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 50 m/s und Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal (FWK) bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 27,8 m/s normiert auf die jeweiligen Luftwiderstandsbeiwerte der stationären Anströmung.

Die normierten Luftwiderstandsbeiwerte der Messungen im Maßstab 1:1 (FWK) zeigen den gleichen Trend wie die Werte im Modellwindkanal. Jedoch weichen die Differenzen zwischen den verschiedenen Signalen voneinander ab. Zusätzlich ergibt sich zwischen dem Maßstab 1:4 und 1:1 eine Abweichung. Es werden weitere Untersuchungen benötigt um zu überprüfen welche der Ergebnisse die Realität am besten darstellen. Dazu werden im Kapitel 7.1 Untersuchungen der Signale mit numerischen Simulationen vorgestellt und werden mit den Ergebnissen der Windkanalversuche verglichen.

6.3 Nachbilden der Anströmbedingungen in der leeren Messstrecke der SWG

Das DLR-Klappensystem wurde entwickelt, um instationäre Anströmbedingungen nachzubilden und um instationären Fahrmanövern unter Berücksichtigung von Frequenzen bis mindestens 7,5 Hz zu erzeugen. Um letzteres zu erreichen ist nach Gleichung (13) eine Flapfrequenz von ca. 32 Hz nötig. Bei der Hinterherfahrt decken diese Frequenzen sowohl die Maxima in den Geschwindigkeitsspektren als auch die anfänglichen Bereiche der Abnahme von S im Spektrum (siehe Abbildung 5-16) ab.

Einerseits wurde überprüft, wie die statistisch stationären Anströmbedingungen der Hinterherfahrt (siehe Tabelle 5-5) erreicht werden können, andererseits, wie die instationäre Anströmung in Form des Anströmwinkels über die Zeit sowohl für die Hinterherfahrt als auch für das Überholmanöver simuliert werden kann. Die zuverlässige Nachbildung der Strömung auf der leeren Messstrecke bildet die Grundlage für die Untersuchung der Auswirkung der Anströmung auf die Kräfte und Drücke am Fahrzeug.

6.3.1 Nachbilden der statistischen Größen T_u und L

Die statistisch stationären Eigenschaften der Hinterherfahrt ermöglichen es, diese unter anderem mit Hilfe der Größen T_u und L zu beschreiben. Diese Größen wurden in den Fahrversuchen bestimmt und werden daher im Folgenden als Zielgrößen für einen geeigneten Versuchsaufbau verwendet.

Bestimmung der Transferfunktionen der Flapbewegung für statistische Strömungsgrößen

Um die statistischen Größen im Windkanal gezielt erreichen zu können, musste zunächst geklärt werden, in welchem Zusammenhang die Turbulenzintensitäten und die integralen Längenskalen mit der Bewegung der Flaps des Klappensystems stehen. Zur Nachbildung der statistischen Größen T_u und L

der Hinterherfahrt mit dem Klappensystem wurde daher deren Abhängigkeit von der maximalen Flapauslenkung β_{flap} und der Flapfrequenz f_{flap} untersucht. Hierzu wurden die Flaps in der ansonsten leeren Messstrecke in Phase sinusförmig bewegt. Sofern die sinusförmige Anregung auch in der Strömung auftritt, beeinflussen die Amplitude, die Turbulenzintensität und die Frequenz das integrale Längenmaß.

Zunächst soll untersucht werden, ob und wie gut die sinusförmige Anregung mit dem Klappensystem in die Strömung übertragen wird. Abbildung 6-28 zeigt das Spektrum der Quergeschwindigkeiten über eine Frequenz von 0,1 Hz - 40 Hz. Die Anregungsfrequenzen an den Flaps lagen zwischen $f_{\text{flap}} = 5$ Hz und 30 Hz bei einem Flapausschlag von $\beta_{\text{flap}} = 10^\circ$. Die verwendeten Messwerte wurden an der mittleren Sonde des Messarrays im Kanal gemessen (siehe Kapitel 4.1.1). Die Messungen wurden über einen Zeitraum von 100 s durchgeführt. Diese Messzeit gewährleistete, dass zwischen 500 und 3000 Wiederholungen der Flapbewegung und der zugehörigen Strömung erfasst wurden

Die Anregungsfrequenzen treten im Spektrum deutlich für das jeweilige Signal auf. Die Anregung der Strömung mit den Flaps bei einer bestimmten Frequenz erzeugt also in der Strömung Strukturen mit derselben Frequenz. Bei höheren Frequenzen verbreitert sich der Frequenzbereich der Strukturen dabei etwas im Vergleich zu den niedrigeren Frequenzen, wo der Frequenzbereich der auftretenden Strukturen näher an der Anregungsfrequenz liegt. Vermutlich beginnen die Strömungsstrukturen bei hohen Frequenzen bereits während der Konvektion, ihre Energie in andere Frequenzbereiche abzugeben. Dennoch sind auch bei hohen Frequenzen die Strukturen im Bereich der Anregungsfrequenzen dominierend.

Mit dem Klappensystem können also wiederholbare, periodische, sinusförmige Strömungsstrukturen in der Messstrecke erzeugt werden, die der vorgegebenen Flapbewegung entsprechen. Über eine Reduzierung des Flapausschlags auf 5° kann die erreichbare Frequenz sogar auf bis zu 50 Hz erhöht werden. Die hohen Flapfrequenzen erlauben die Nachbildung eines großen Frequenzbereichs im Modellmaßstab. Der große Frequenzbereich ist von Vorteil, da sich die Frequenzen auf Grund des kleineren Modellmaßstabes von 1:4 im Windkanal bei konstanter Strouhal-Zahl deutlich erhöhen (siehe Gleichung (13)).

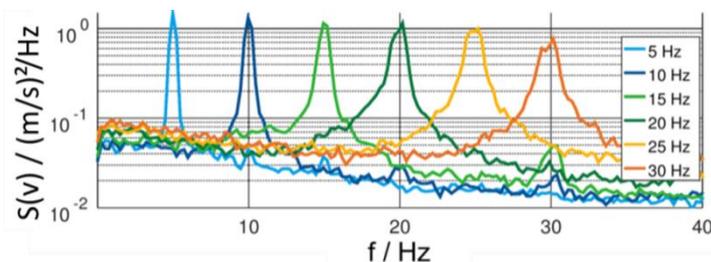


Abbildung 6-28: Spektren der Quergeschwindigkeiten in der Strömung bei sinusförmigen Anregungsfrequenzen von $5 \text{ Hz} < f_{\text{flap}} < 30 \text{ Hz}$.

Mit dem Wissen, dass die Flapbewegung in die Strömung übertragen wird, stellte sich als nächstes die Frage, in welchem Zusammenhang die Parameter Amplitude β_{flap} und Frequenz f_{flap} der Flaps zur Strömungsanregung mit den im Kanal erzielten Turbulenzintensitäten und integralen Längenmaßen stehen, damit bestimmte Werte für T_u und L gezielt generiert werden können. Hierzu wurden die Amplitude oder die Frequenz am Flap variiert, um eine Transferfunktion zwischen den Eingabe- und Ausgabeparametern aufzustellen. Um den Einfluss des Flapausschlags zu untersuchen, wurde die Frequenz konstant bei 10 Hz gehalten und β_{flap} zwischen 0° und 20° variiert. Um den Einfluss der Frequenz zu untersuchen, wurde die maximale Auslenkung auf 10° für Flapfrequenzen zwischen 1 Hz und 30 Hz festgelegt. Die Messzeit für die Versuche betrug 100 s und die Abtastrate der Messtechnik lag bei 250 Hz. Somit wurde eine ausreichende Auflösung der zu erwartenden Frequenzen in der Strömung von bis zu ~ 30 Hz gewährleistet. Zugleich erlaubte die Messzeit eine Auswertung von 100 Wiederholungen der Sinusbewegung für den Extremfall bei der niedrigsten Anregungsfrequenz von 1 Hz.

Abbildung 6-29 (links) zeigt die erzeugten mittleren Turbulenzintensitäten Tu_x (blaue Markierungen) und Tu_y (orangene Markierungen) über dem maximalen Flapausschlag β_{flap} . Der Durchschnittswert für die Turbulenzen wurde über alle Sonden am Windkanalarray ermittelt (siehe Kapitel 4.1.1). Die zugehörigen Verläufe der Regressionen (gestrichelte Linien) zeigen, dass die Turbulenzintensität für beide Geschwindigkeitskomponenten nahezu linear mit größeren Auslenkungen der Flaps ansteigt. Die Turbulenzintensitäten werden vom Ausschlag der Flaps beeinflusst. Allerdings werden beide Geschwindigkeitskomponenten gleichzeitig durch den Flapausschlag beeinflusst. Ohne Flapbewegung sind die Turbulenzintensitäten mit einem Wert von 0,7 % in beide Raumrichtungen gleich. Mit Anregung der Strömung steigt Tu_y mit zunehmenden Flapausschlag stärker als Tu_x an. Während in x-Richtung Turbulenzintensitäten von 2,3 % bei maximal möglichem Ausschlag erreicht werden, entstehen in Querrichtung Turbulenzintensitäten von bis zu 9,7 %. In Querrichtung werden demnach die – zum Nachbilden der Hinterherfahrt bei 50 m Abstand und der Straßenfahrt – benötigten Turbulenzintensitäten von 6 % erreicht. Auch das andere Extrem – ein Wert für Tu_y von 2 % für die Konstantfahrt – kann durch das System abgebildet werden. In Strömungsrichtung sind die Turbulenzintensitäten jedoch zu niedrig, um Turbulenzen der Hinterherfahrt ohne weiteres direkt abbilden zu können.

Abbildung 6-29 (rechts) zeigt die integralen Längenmaße L_x (blaue Markierungen) und L_y (orangene Markierungen) über der Anregungsfrequenz an den Flaps. Die Anregungsfrequenz während der Versuche lag zwischen $f_{flap} = 1$ Hz und 30 Hz bei einem Flapausschlag von $\beta_{flap} = 10^\circ$. Die gestrichelten Linien der Regression basieren auf Potenzfunktionen.

Mit zunehmender Flapfrequenz fallen sowohl die Werte für das Längenmaß L_x als auch die Werte für L_y ab; sie sind also nicht getrennt voneinander über die Frequenz regulierbar. Während das Längenmaß bei hohen Frequenzen von 30 Hz in beide Raumrichtungen im Bereich von 0,25 m liegt, steigt L_y mit verringerten Frequenzen deutlich stärker an. Bei einer Anregungsfrequenz von 1 Hz steigt L_x auf 2,3 m, während der Wert für L_y bei 8 m liegt. Überträgt man den Modellmaßstab auf die Originalgröße, so liegen die kleinsten Längenmaße bei 1 m und die größten bei 9,2 m in x- und 32 m in y-Richtung. In beide Raumrichtungen können also die gewünschten Längenmaße aus Konstant- und Hinterherfahrt erreicht werden. Da die Längenmaße jedoch nicht unabhängig voneinander über die Frequenz eingestellt werden können, ist es gegebenenfalls nicht möglich die Längenmaße in beide Raumrichtungen gleichzeitig zu erreichen.

Die dargestellten Zusammenhänge zwischen β_{flap} und Tu bzw. f_{flap} und L zeigen, dass die gewünschten statistischen Größen der Turbulenzintensität und des integralen Längenmaßes mit Hilfe von Transferfunktionen über eine gezielte Wahl des Flapausschlags und der Frequenz des Flaps eingestellt werden können. In y-Richtung können dabei alle Zielgrößen der Straßenfahrt erreicht werden, während in x-Richtung die Turbulenzintensität Tu_x zu niedrig ist. Des Weiteren ist zu beachten, dass auf Grund der gemeinsamen Abhängigkeit von β_{flap} für Tu und f_{flap} für L die jeweiligen Raumrichtungen – bei einer parallelen, sinusförmigen Strömungsanregung – nicht unabhängig voneinander eingestellt werden können.

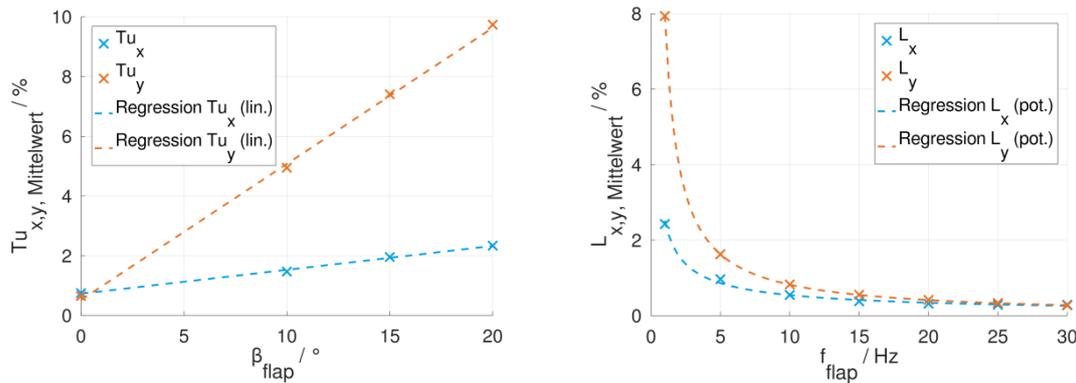


Abbildung 6-29: Turbulenzintensitäten für die freie Messstrecke in Abhängigkeit der maximalen Amplitude der Flaps (links) und Abhängigkeit der integralen Längenmaße von der Flapfrequenz bei $u_\infty = 30$ m/s. Blaue Markierungen: Messwerte der x-Komponenten; orangene Markierungen: Messwerte der y-Komponenten; gestrichelte Linien: zugehörige Ausgleichskurven.

Erweiterung des aktiven Klappensystems mit passiven Turbulenzgeneratoren

Im vorherigen Abschnitt wurde gezeigt, dass die Turbulenzintensität in Fahrtrichtung nicht alleine durch die sinusförmige Bewegung der Flaps erreicht werden kann. Daher soll untersucht werden, ob die Resultate durch zusätzliche, passive Elemente verbessert werden können. Um die Turbulenzintensität in x-Richtung zu erhöhen, wurden daher – wie in Kapitel 4.2.3 beschrieben – zusätzliche passive Turbulenzgeneratoren (TG) eingebaut.

Abbildung 6-30 zeigt die mittleren Turbulenzintensitäten Tu_x (blaue Balken) und Tu_y (rote Balken) für den großen (obere Reihe) und den kleinen (mittlere Reihe) passiven Turbulenzgenerator sowie ohne zusätzliche passive Anregung (untere Reihe). Die Strömung wurde für die Versuche mit dem aktiven Klappensystem mit $\beta_{flap} = 10^\circ$ und $f_{flap} = 10$ Hz angeregt.

Für Tu_x ist ein Anstieg der Turbulenzintensität von 1,4 % auf 4 %, verursacht durch den kleinen passiven Turbulenzgenerator, zu verzeichnen. Durch den großen passiven Turbulenzgenerator wird Tu_x sogar auf 5,7 % erhöht. In Querrichtung ist nahezu kein Einfluss des kleinen passiven Turbulenzgenerators zu erkennen und es wird weiterhin eine Turbulenzintensität von 4,9 % erreicht. Der große Turbulenzgenerator hingegen hat einen leichten Einfluss auf die Turbulenzintensität Tu_y in Form einer Erhöhung von ~0,6 %. Die Anregungsfrequenz von 10 Hz tritt weiterhin in der Strömung auf.

Durch die Kombination des aktiven Klappensystems mit den zusätzlichen passiven Turbulenzgeneratoren können Turbulenzintensitäten bis zu 5,7 % für Tu_x und Tu_y erreicht werden. Diese Ergebnisse zeigen, dass eine Kombination von aktiven und passiven Systemen geeignet ist, um die realen Werte der Hinterherfahrt von 6 % zu simulieren. Der Einsatz des kleinen passiven Turbulenzgenerators beeinflusst die Turbulenzintensität für die Quergeschwindigkeitskomponente nicht, der große Turbulenzgenerator nur geringfügig.

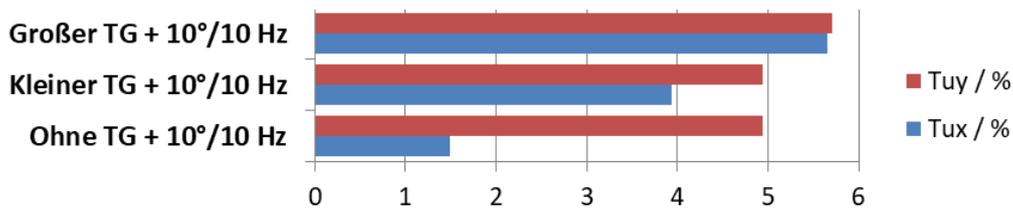


Abbildung 6-30: Mittlere Turbulenzintensitäten am Array für Tu_x (rote Balken) und Tu_y (blaue Balken) für eine Anregung der Strömung mit 10° und 10 Hz durch die Flaps ohne passiven Turbulenzgenerator (unten), mit dem kleinen Turbulenzgenerator (mittig) oder dem großen Turbulenzgenerator (oben) im Düsenbereich.

6.3.2 Erreichte statistischen Größen im Windkanal im Vergleich zu den Fahrversuchen

Es wurde gezeigt, dass die passiven Turbulenzgeneratoren zusammen mit dem Klappensystem geeignet sind, die Turbulenzintensitäten und Längenskalen gezielt zu beeinflussen. Es soll nun zunächst geprüft werden, welcher Bereich von Tu und L mit Hilfe der Systeme abgedeckt werden kann. Danach wird dieser Bereich den in der Straßenfahrt und in der Hinterherfahrt ermittelten Ergebnissen gegenübergestellt.

In Abbildung 6-31 sind die im Windkanal erreichten Turbulenzintensitäten über den zugehörigen integralen Längenmaßen für die x -(linke Abbildung) und y -Richtung (rechte Abbildung) aufgetragen. Die unterschiedlichen farbigen Markierungen stellen die verschiedenen passiven Turbulenzgeneratoren dar. Orangene Kreise stehen für den großen passiven Turbulenzgenerator, grüne $+$ -Symbole für den kleinen Turbulenzgenerator und blaue x -Symbole für Messungen ohne Turbulenzgeneratoren. Die blau umrandete, graue Fläche zeigt zusammenfassend die im Windkanal erzeugbaren Bereiche für Tu und L . Die Strömungsgeschwindigkeit in Windkanal betrug 30 m/s. Die Flaps wurden sinusförmig bewegt und die Versuche wurden mit Anregungsfrequenzen von 0 Hz - 30 Hz in Kombination mit Flapwinkeln zwischen 0° und 20° durchgeführt.

Eine sinusförmige Anregung in Kombination mit den passiven Turbulenzgeneratoren generiert in x -Richtung Bereiche von $0,5\% < Tu_x < 7,5\%$ und $0,2\text{ m} < L_x < 6\text{ m}$. Dabei entstehen aufgrund der unterschiedlich starken Einflüsse der Turbulenzgeneratoren auf die Turbulenzintensität Tu_x 3 Regionen. Der Einsatz der Turbulenzgeneratoren führt dazu, dass sich die Turbulenzintensitäten erhöhen. Dabei nimmt die Turbulenzintensität mit der Breite der Elemente der Turbulenzgeneratoren zu. Das maximal erreichte integrale Längenmaß L_x wird allerdings reduziert.

In y -Richtung wird ein Bereich von $0,3\% < Tu_y < 12\%$ und $0,2\text{ m} < L_y < 8,6\text{ m}$ abgedeckt. Es zeigt sich, dass die Turbulenzintensität in y -Richtung kaum von den Turbulenzgeneratoren abhängt, obwohl Tu_x durch die passiven Turbulenzgeneratoren deutlich erhöht wird. Die Amplitude der Querströmungsrichtung wird also nur geringfügig beeinflusst. Große integrale Längenskalen – und somit niedrige Frequenzen in der Strömung – werden jedoch von dem großen passiven Turbulenzgenerator beeinflusst.

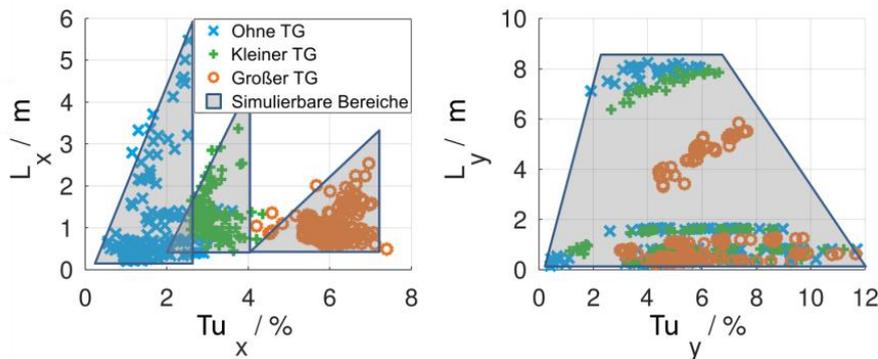


Abbildung 6-31: Mögliche Bereiche (blau umrandete, graue Bereiche) aus Turbulenzintensitäten und integralen Längenskalen im Windkanal in x- (links) und y-Richtung (rechts) mit unterschiedlichen Kombinationen aus aktiver, sinusförmiger Anregung mittels Klappensystem und den passiven Turbulenzgeneratoren (blaue Kreuze: kein passives System, grüne Pluszeichen: kleine Turbulenzgenerator, orangene Kreise: großer Turbulenzgenerator).

Im Folgenden sollen die Ergebnisse für die Turbulenzintensitäten und die integralen Längenmaße in Bezug zu den in den Straßen- und Hinterherfahrten erzielten Ergebnissen gesetzt werden. Abbildung 6-32 zeigt einen Vergleich der Ergebnisse für die Turbulenzintensitäten über den zugehörigen integralen Längenmaßen. Es sind die Ergebnisse aus den Windkanalversuchen sowie – zum Vergleich – die Ergebnisse aus den Versuchen der Straßen-, Konstant- und Hinterherfahrten bei 27,8 m/s aufgetragen. Die Ergebnisse für die Strömungskomponente in Fahrtrichtung sind links dargestellt. Die Ergebnisse für die Strömungskomponente in Querrichtung sind rechts aufgeführt. Die zuvor in Abbildung 6-31 gezeigten Bereiche – die von den unterschiedlichen Windkanalkonfigurationen abgedeckt werden – sind als blau umrahmte, graue Flächen eingefügt. Das integrale Längenmaß aus den Windkanalversuchen wurde – zum Vergleich mit den Ergebnissen aus den Fahrversuchen – auf den Originalmaßstab skaliert. Die Ergebnisse aus den Versuchsfahrten auf der Straße und auf der Teststrecke (vgl. Abbildung 5-21 und Abbildung 5-4) sind im Hintergrund dargestellt. Für die Konstant- und Hinterherfahrten sind die gemittelten Ergebnisse als unterschiedlich farbige Ringe eingezeichnet, für die Straßenfahrt sind die Ergebnisse aus Einzelabschnitten als schwarze Punkte eingetragen.

In y-Richtung können im Windkanal die wesentlichen Bereiche der Turbulenzintensitäten und der relevanten Längenskalen abgebildet werden. Es werden Turbulenzintensitäten bis 12 % erzeugt und Längenskalen zwischen 1 m und 32 m sind auf Grund der hohen mittels Klappensystem erreichbaren Frequenzen möglich. Die großen Längenskalen sind lediglich bei hohen Turbulenzgraden problematisch. Die mittleren Werte sowohl der Konstant- als auch der Hinterherfahrten können alle – mit Ausnahme des Falls mit 10 m Abstand - erreicht werden. Des Weiteren kann ein Großteil der Resultate aus den Straßenfahrten abgebildet werden.

Die Ergebnisse aus den Windkanalversuchen lassen sich in x-Richtung in 3 Bereiche unterteilen. Diese entstehen durch den Einsatz der unterschiedlichen passiven Turbulenzgeneratoren. Die Längenmaße aus den Straßen- und Teststreckenfahrten bei Turbulenzintensitäten bis 8 % werden nahezu alle erreicht. Im Windkanal kann mit dem Versuchsaufbau aus aktivem Klappensystem und passiven Turbulenzgeneratoren also ein Großteil der Anströmbedingungen aus den Teststrecken- und Straßenfahrten nachgebildet werden. Die Turbulenzintensitäten der Hinterherfahrten werden für beide Raumrichtungen für Abstände von 30 m - 100 m erreicht.

Mit dem Klappensystem kann außerdem ein Großteil der in der Literatur beschriebenen Bereiche von Tu und L nachgebildet werden. Die von Lindener [9] ermittelten Turbulenzintensitäten bis 7 % und Längenskalen von 1 m - 10 m werden fast vollständig abgedeckt. Selbiges gilt für die von McAuliffe

[12] im kanadischen Straßenverkehr ermittelten Werte von bis zu 8 % und 8 m. Von Wordley [10] wurden auf australischen Straßen zwar auch Turbulenzintensitäten bis 16 % ermittelt, diese traten jedoch nur als Ausnahmefälle im Autobahnverkehr auf (siehe Abbildung 3-1). Der größte Teil seiner Messergebnisse lag unter $Tu = 10\%$ bei Längenmaßen bis 16 m – in Ausnahmefällen bei bis zu 24 m. Demnach kann auch der wesentliche Teil der Größen seiner Untersuchungen simuliert werden. Lediglich die Ausnahmefälle können nicht nachgestellt werden.

Das vorgestellte System ist also geeignet den wesentlichen Teil der auf der Straße vorkommenden Turbulenzintensitäten und integralen Längenskalen zu simulieren. Ein Vergleich zeigt, dass dies nicht nur für die Ergebnisse der Messungen auf den deutschen Autobahnen gilt, sondern auch für den Verkehr in anderen Regionen der Welt. Des Weiteren wurde gezeigt, dass auch die Konstantfahrt und Hinterherfahrten mit einem Abstand von mehr als 30 m simuliert werden können. L und Tu_y werden dabei durch reproduzierbare, periodische, sinusförmige Strömungsanregung mit den Flaps realisiert, während die Turbulenzintensität in x-Richtung durch die passiven Turbulenzgeneratoren erzeugt wird. L wird durch die Flapfrequenz und Tu_y durch die Amplitude der Flaps reguliert.

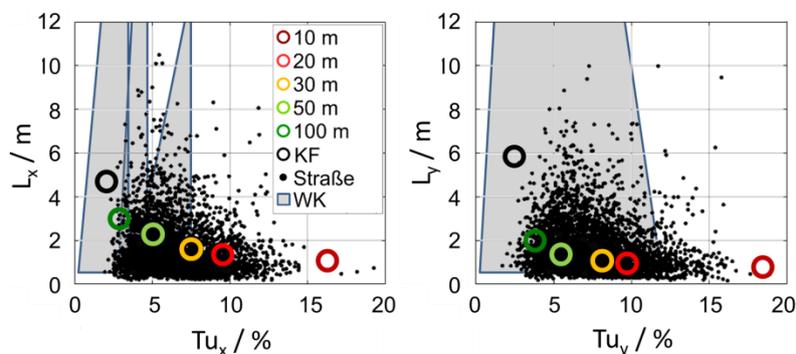


Abbildung 6-32: Vergleich des Turbulenzintensitäten und Längenskalen in x- und y-Richtung für Straßen- (schwarze Punkte), Konstant- (schwarzer Kreis) und Hinterherfahrten (farbige Kreise) bei 27,8 m/s mit den im Windkanal (blau umrahmte Bereiche) – auf 1:1 umgerechnet – erreichten Werten.

6.3.3 Nachbilden des zeitlich variablen Anströmwinkels in der leeren Messstrecke

Das Klappensystem wurde zum einen entwickelt, um die statistischen Größen der Turbulenzintensität sowie des integralen Längenmaßes über große Bereiche nachbilden zu können, und zum anderen, um Zeitverläufe des Anströmwinkels $\beta(t)$ zu simulieren. Im Folgenden werden daher die instationären Anströmwinkel in der leeren Messstrecke der SWG für die Hinterherfahrt und das Überholmanöver betrachtet und mit den Messergebnissen von der Teststrecke verglichen.

Hierfür wurden für das Klappensystem 2 eindimensionale Transferfunktionen zur Bestimmung des Anströmwinkels im Windkanal ermittelt (siehe Kapitel 4.2.3, Abbildung 4-19). Eine Transferfunktion bestimmt dabei die Abhängigkeit vom Winkel der Flaps und die andere die Abhängigkeit von der Anregungsfrequenz an den Flaps. Ist also der gewünschte zeitliche Verlauf des Anströmwinkels bekannt (z.B. aus Messungen am Fahrzeugarray auf der Teststrecke), so kann mit Hilfe der Transferfunktionen die Bewegung für die Flaps bestimmt werden, um diesen Verlauf in der Strömung in der Messstrecke zu simulieren. Sofern über die Breite unterschiedliche Anströmwinkel erreicht werden sollten, wurden die Messungen an den Sondenpositionen in y-Richtung des Fahrzeugarrays auf die y-Positionen der Flügel interpoliert. Dieser Vorgang wird im Folgenden als individuelle (ind.) Flapbewegung bezeichnet, um ihn von der parallelen (par.) Flapbewegung abzugrenzen. Der zeitliche Verlauf der Strömungsanregungen wird nach Gleichung (13) für eine konstante Strouhal-Zahl auf den Modellmaßstab 1:4 und auf die Anströmgeschwindigkeit von 30 m/s für die Windkanalmessungen übertragen.

Instationäre Anströmbedingungen der Hinterherfahrt

Neben dem Einfluss der statistischen Anströmbedingungen der Hinterherfahrt soll auch untersucht werden, welche Auswirkungen die instationäre Anströmung hat. Daher wird neben dem generischen Sinus-signal auch das Signal der Hinterherfahrt auf der Teststrecke über die Zeit und die Breite simuliert.

Abbildung 6-33 zeigt einen Zeitabschnitt der Anströmwinkel an 3 unterschiedlichen Sonden des Fahrzeug- bzw. Windkanalarrays. Links ist das reale Signal von der Teststrecke für die Sonde in der Mitte (orange), für die Sonde ganz links (blau) sowie für die Sonde ganz rechts (gelb) 0,5 m über dem Boden dargestellt. Die Abbildung in der Mitte zeigt die individuelle Nachbildung des Teststreckensignals über die Breite des Windkanals. Für die Abbildung ganz rechts wurde ein generisches Signal mit einem sinusförmigen Verlauf bei 10 Hz und 10° an parallel bewegten Flaps vorgegeben. Die Signale der Windkanalmessungen wurden auf die 1:1-Maße y^* für die Sondenpositionen und auf die Zeit t^* der Versuche auf der Teststrecke übertragen.

Alle 3 Signale liegen im Bereich von $\beta = \pm 6^\circ$. Sie unterscheiden sich jedoch in ihrer Form. Die Signale zeigen ein periodisches Verhalten, das über den Abstand der Sonden nahezu in Phase ist und über die Breite eine große Kohärenz aufweist. Während die sinusförmige Anregung durch die Flaps auch zu sinusförmigen Bewegungen in der Strömung führt, sind für die anderen beiden Signale Unterschiede zwischen den Perioden zu erkennen. So ist das Minimum bei $t = 0,5$ s bei *HF Teststrecke* etwas niedriger als die umliegenden Minima und die Breite des Maximums etwas ausgedehnter als bei der Anregung mit einem sinusförmigen Signal. Dieses Verhalten auf der Teststrecke wird im Windkanal jedoch mit dem Signal $HF \beta(y, t)$ – wie erhofft – gut nachgebildet. Jedoch fällt bei beiden Windkanalergebnissen auf, dass die Abweichungen der Anströmwinkel an den Messpositionen zum selben Zeitpunkt geringer sind als auf der Teststrecke. Die Unterschiede zwischen den Winkeln liegen auf der Teststrecke allerdings nur im Bereich von ca. $\pm 2^\circ$. Vermutlich ist der Abstand der Klappen in der Messstrecke zu groß, um diese kleinen Unterschiede in der Breite zuverlässig auflösen zu können. Diese Winkelunterschiede sind jedoch nur temporär und im Vergleich zum insgesamt auftretenden Winkelbereich eher klein. Das Klappensystem mit dem Signal $HF \beta(y, t)$ ist dennoch ausreichend, um die Strömung von der Teststrecke im Windkanal über die gesamte Länge in Hinblick auf den Verlauf des Winkelsignals abbilden zu können.

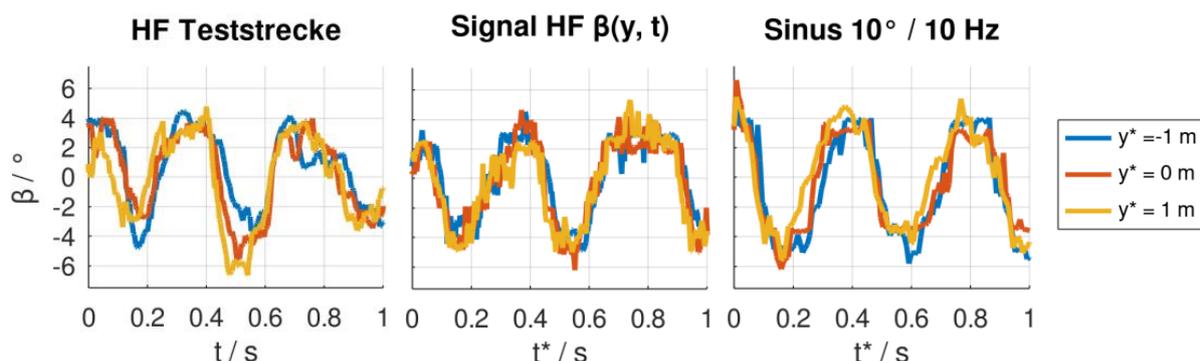


Abbildung 6-33: Zeitabschnitt der Anströmwinkel β während der Hinterherfahrt auf der Teststrecke (links) und im Windkanal mit einer Anregung basierend auf der Messung auf der Teststrecke (Mitte) beziehungsweise einem generischen, sinusförmigen Anregung mit 10° und 10 Hz (rechts) für die Sonden in der Fahrzeugmitte (rot), 1 m links (blau) und 1 m rechts (gelb) von der Mitte (t^* und y^* auf 1:1 skaliert).

Abbildung 6-33 zeigt, dass sich die im Fahrversuch auf der linken und rechten Fahrzeugseite gemessenen Anströmwinkel etwas unterscheiden. Dies hängt mit den im Nachlauf vorhandenen Strömungsstruk-

turen zusammen. Wie in Kapitel 5.2.1 mit Hilfe der Korrelationsfunktion gezeigt, liegen diese Strukturgrößen für u' und v' zum Teil im Bereich der Fahrzeugmaße. Laut Mankowski et al. [20] können Strukturen dieser Größen einen deutlichen instationären Einfluss auf die Kräfte am Fahrzeug haben, während sehr große Strukturen als quasi-stationär betrachtet werden können und sehr kleine Strukturen nur geringe Auswirkung auf die Kräfte am Fahrzeug haben.

In Abbildung 6-34 sind die Korrelationskoeffizienten der 1D-Kreuzkorrelationen für Geschwindigkeitssignale über den Zeitversatz τ dargestellt. Eine detaillierte Erklärung zur Ermittlung des normierten Korrelationskoeffizienten ist in Kapitel 2.3.3 zu finden. Die obere Reihe zeigt die Korrelationen für die Geschwindigkeitsschwankungen u' und die untere Reihe die Korrelationen für die die Geschwindigkeitsschwankungen v' . Links sind die Ergebnisse von den Messungen am Array auf der Teststrecke dargestellt. In der Mitte sind die Korrelationskoeffizienten von den Messungen am Array im Windkanal mit der Anregung $HF \beta(y, t)$ – welche auf den auf der Teststrecke gemessenen Anströmwinkeln basiert – aufgetragen. Rechts sind die Korrelationskoeffizienten für eine sinusförmige Anregung der Strömung im Windkanal mit 10 Hz aufgetragen. Die korrelierten Geschwindigkeitskomponenten wurden mit den in Querrichtung am Array angeordneten Sonden gemessen. Die Sonden waren hierfür bei den Versuchen auf der Teststrecke über die Fahrzeugbreite gleichmäßig verteilt angeordnet. Die Sonde bei $y = -0,98$ m lieferte das Referenzsignal und befand sich in Fahrtrichtung ganz links. In den Windkanalversuchen waren die Sonden in derselben Position, jedoch im Maßstab 1:4, angeordnet. Die Bezeichnung y^* bedeutet, dass die Sondenposition auf die Position im 1:1 Maßstab skaliert wurde. Auch hier war das Signal der linken Sonde das Referenzsignal. Die Kreuzkorrelationen fanden mit der Referenzsonde und einer weiteren Sonde statt. Die Korrelation der Sonde 1 mit sich selbst ist als Autokorrelationen einen Sonderfall. Mit aufsteigender Sondennummer nimmt der Abstand der Sonden in Querrichtung zu. Die Entwicklung des Korrelationskoeffizienten mit zunehmender Sondennummer ist somit ein Maß für die Strukturgröße in Querrichtung. Die Position der Sonden und ihr Abstand zur Referenzsonde sowie ihre farbliche Zuordnung in den Graphen kann der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 6-1: Sondenpositionen und Abstände zur Referenzsonde 1 am Fahrzeugarray für die Versuchsfahrt und die Messungen im Windkanal. Die Abstände sind für das Array am Versuchsfahrzeug angegeben und in den Windkanalversuchen mit 1:4 skaliert gewesen. Die Farben gelten für die Verläufe der Korrelationskoeffizienten in Abbildung 6-34.

Sonde	1 (Referenz)	2	3	4	5
y^* -Position / m	-0,98	-0,49	0	0,49	0,98
Abstand Δy^* zur Referenzsonde / m	0,00	0,49	0,98	1,47	1,96
Farbe in Abbildung 6-34	Blau	Grün	Gelb	Rot	Grau

Die Komponente u' weist in Querrichtung für alle drei Versuche nur geringe Korrelationskoeffizienten für die Kreuzkorrelationen auf, die bei $\tau = 0$ unter 0,3 liegen. Die einzige Ausnahme bildet im Fall der Messungen auf der Teststrecke die direkt angrenzende Sonde bei $y^* = 0,5$ m. Hier erreicht R_u einen Wert von 0,5. Die in Querrichtung gemessenen Signale für u' korrelieren also nicht mit den an der Referenzsonde gemessenen Signalen. Es sind also weder auf der Teststrecke noch im Windkanal großen Strukturen für u' in Querrichtung vorhanden. Auch mit einem Zeitversatz bleiben die Signale in allen drei Fällen unkorreliert.

Die Korrelationskoeffizienten R_v fallen für die Signale von der Teststrecke mit zunehmendem Sondenabstand bei $\tau = 0$ ab. Der Korrelationskoeffizient in Querrichtung bleibt dabei jedoch über 0,5. Es sind also größere Strukturen für v' in Querrichtung vorhanden. Sowohl das die Anregungsform $HF \beta(y, t)$ als auch die sinusförmige Anregung weisen auch hohe Korrelationskoeffizienten bei $\tau = 0$ in Querrichtung auf. Die Korrelationskoeffizienten erreichen jedoch Werte von über 0,8. Die Korrelationskoeffizienten sind also deutlich größer und fallen mit zunehmendem Sondenabstand in Querrichtung weniger

ab – die Struktur wird also in Querrichtung etwas zu groß nachgebildet. Der Abfall der Korrelationskoeffizienten von der Teststrecke mit einem Zeitversatz τ wird mit der Anregungsform $HF \beta(y, t)$ im Windkanal gut nachgebildet, während die Anregung mit einem sinusförmigen Signal zu einer Periodizität im Korrelationskoeffizienten führt und das nicht den Verlauf von der Teststrecke widerspiegelt.

Mit dem Klappensystem kann die instationäre Anströmung der Hinterherfahrt gut nachgebildet werden. Der Verlauf des Anströmwinkels zeigt, dass sowohl die Amplitude als auch der Verlauf über die Zeit gut mit den im Fahrversuch gemessenen Werten übereinstimmt. Die Korrelationen zeigen, dass die Strukturgrößen in Querrichtung für die Komponenten u' und v' ebenfalls gut getroffen werden. Die Strukturen korrelieren in der Querrichtung für v in den Windkanalversuchen etwas besser als im Fahrversuch auf der Teststrecke. Vermutlich lässt es der begrenzte der Abstand zwischen den Klappen nicht zu noch kleinere Strukturen über die die gesamte Fahrzeugbreite zu erzeugen. Die Entwicklung der Korrelationskoeffizienten R_v über den Zeitversatz τ entspricht für das Signal $HF \beta(y, t)$ nahezu dem in den Fahrversuchen ermittelten Verlauf. Die Strukturen kommen zum gleichen Zeitpunkt – wie auf der Teststrecke – über die gesamte Breite am Fahrzeug an. In Fahrtrichtung werden die Strukturen also auch gut dargestellt. Das Zeitsignal der Geschwindigkeiten deutet an, dass auch die sinusförmige Bewegung als erste Näherung geeignet ist. Die Korrelation in Querrichtung zeigt jedoch ein deutlich abweichendes Verhalten über den Zeitversatz τ für das sinusförmige Signal gegenüber den Messergebnissen aus den Fahrversuchen von der Teststrecke.

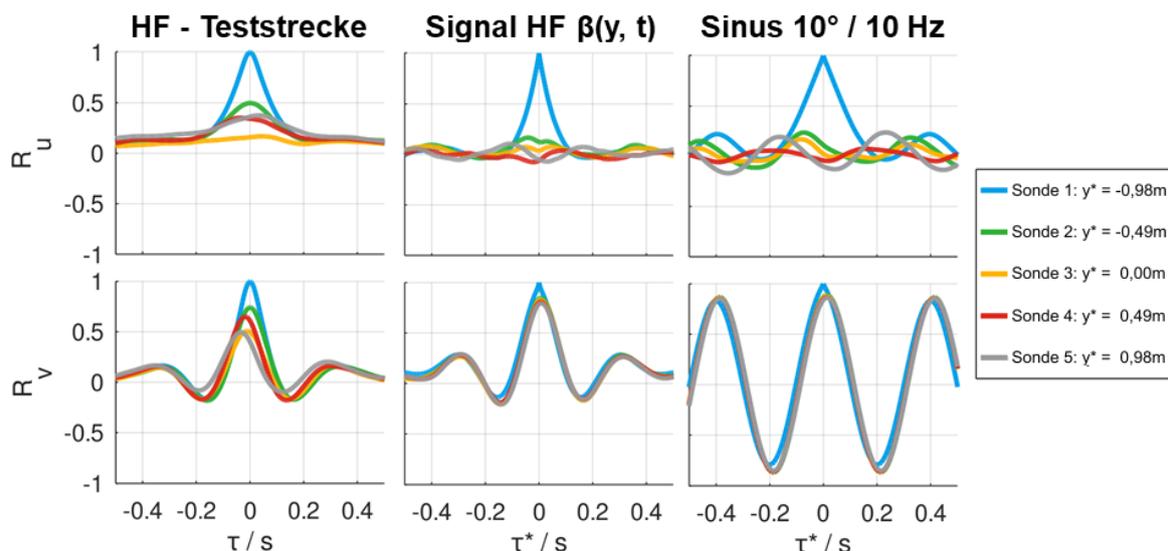


Abbildung 6-34: Korrelationen für u (oben) und v (unten) am Array im Fall der Hinterherfahrt auf der Teststrecke (links), im Fall des nachgebildeten Signals von der Teststrecke im Windkanal (Mitte) und des generischen, sinusförmigen Anregung von 10° und 10 Hz in Windkanal (rechts) mit Sonde 1 bei $y^* = -1\text{ m}$ als Referenz (τ^* und y^* auf 1:1 skaliert).

Instationäre Anströmbedingungen des Überholmanövers

Im Folgenden wird die instationäre Anströmung für das Überholmanöver im Windkanal im Vergleich mit dem Signal von der Teststrecke gezeigt. Beim Überholvorgang handelt es sich um ein instationäres Fahrmanöver, das, im Gegensatz zur Hinterherfahrt, unterschiedliche Strömungseigenschaften in Abhängigkeit von Abstand zwischen den Fahrzeugen aufweist und sich dadurch in 4 Phasen einteilen lässt (siehe Kapitel 5.3). Wichtig ist dabei, dass das vorherfahrende Fahrzeug auch ein eigenes Druckfeld umgibt, das sich im Kanal durch das Klappensystem nicht direkt simulieren lässt. Die indirekte Auswirkung auf die Anströmung ist jedoch in den Messungen des Anströmwinkels mit dem Array enthalten. Des Weiteren lag der Fokus der Versuche in erster Linie auf den großskaligen Effekten des gesamten

Überholmanövers. In diesem Kontext war der Einfluss des Druckfeldes nur in der direkten Umgebung des Transporters relevant und wurde somit vernachlässigt.

Abbildung 6-35 zeigt den Winkelverlauf in der Anströmung und den Winkelverlauf des Flaps über die Zeit. Auf der linken y-Achse sind die Winkel zu den Anströmwinkelverläufen für die Versuchsfahrt (orange) und für die Kanalmessungen (blau) aufgetragen. Die dem Verlauf des Flapausschlags (grün) zugehörigen Winkel sind auf der rechten y-Achse dargestellt. Die Zeit für die Signale wurde auf die reale Zeit auf der bei einer konstanten Strouhal-Zahl skaliert. Für die Windkanalversuche war zusätzlich der kleine passive Turbulenzgenerator eingebaut, um realistischere Werte für Tu_x zu generieren. Der Flapwinkel wurde um die Konvektionszeit verschoben, um einen direkten Vergleich der Signale zu ermöglichen. Die Ergebnisse von den Versuchsfahrten stammen aus einem Überholmanöver mit einer Differenzgeschwindigkeit von 5,6 m/s zwischen dem Versuchsfahrzeug und dem Transporter. Die Messposition befand sich an der mittleren Sonde bei $y = 0$ m in einer Höhe von 0,5 m.

Die Verläufe der 3 Signale stimmen über die Zeit des Überholvorgangs gut überein. Bis zu einem Wert von $t = 2$ s sind in allen Signalen periodische Strukturen zu erkennen, die meistens sowohl in der Periode, der Amplitude und in der Phasenlage übereinstimmen. Der Mittelwert liegt dabei leicht unter 0° , weist also eine geringfügige Asymmetrie auf. Bei 1,1 s kommt es zu einer leichten Abweichung zwischen der Kanalmessung und der Messung auf der Teststrecke. Dies ist vermutlich auf die Vereinfachungen, bei der die 2D-Transferfunktion durch 2 eindimensionalen Transferfunktionen ersetzt wurde, zurückzuführen. Gleiches gilt für den Übergang aus den Nachlaufstrukturen in die großskaligen Verläufe im Verdrängungsbereich des vorherfahrenden Fahrzeugs bei 1,5 - 2 s.

Die nächste Phase (ab $t = 2$ s) – die Vorbeifahrt am vorausfahrenden Fahrzeug – ist zuerst geprägt von einem großskaligen Anstieg des Anströmwinkels (2 s – 3 s) auf positive Werte. Diesem Anstieg folgt eine großskalige Schwankung im Anströmwinkel mit negativem Vorzeichen. Positive Winkel stehen dabei für eine Anströmung von links und negative Anströmwinkel für eine Anströmung von rechts. Diese großskaligen Schwankungen stimmen über die Zeit von 2 s – 5 s im Kanal gut in der Amplitude mit den Winkeln aus der Versuchsfahrt überein. Im Bereich von 4 s – 5 s gibt es jedoch eine Abweichung: Hier erreicht der Flap seine mechanische Grenze – die Flaps und somit die Strömung können also nicht weiter ausgelenkt werden. Da die Flaps hier statisch an einer Position verharren, gilt die dynamische Übertragungsfunktion nicht mehr uneingeschränkt und die Anströmwinkel im Windkanal fallen bei diesem Flapwinkel auf statische Werte von $\beta \approx 4^\circ$ ab. Im Bereich der freien Anströmung stimmen die Werte im Kanal und auf der Teststrecke wieder gut überein und liegen im Bereich von $\beta \approx 0^\circ$.

Der zeitliche Verlauf des Anströmwinkels im Windkanal $\beta_{\text{Windkanal}}$ bildet den Verlauf des Anströmwinkels auf der Teststrecke gut nach. Das Nachbilden des Signals über 2 eindimensionale Transferfunktionen ist ausreichend für die Darstellung der Anströmung des Überholmanövers. Eine zweidimensionale Transferfunktion dürfte das Ergebnis – insbesondere im Übergangsbereich vom Nachlauf in die Vorbeifahrt – jedoch noch weiter verbessern. Auf Grund des großen zeitlichen Aufwandes diese Transferfunktion für alle Kombinationen im gesamten möglichen Winkel- und Frequenzbereich zu ermitteln, war ein Test mit einer solchen zweidimensionalen Transferfunktion hierfür im Rahmen dieses Projektes allerdings nicht möglich.

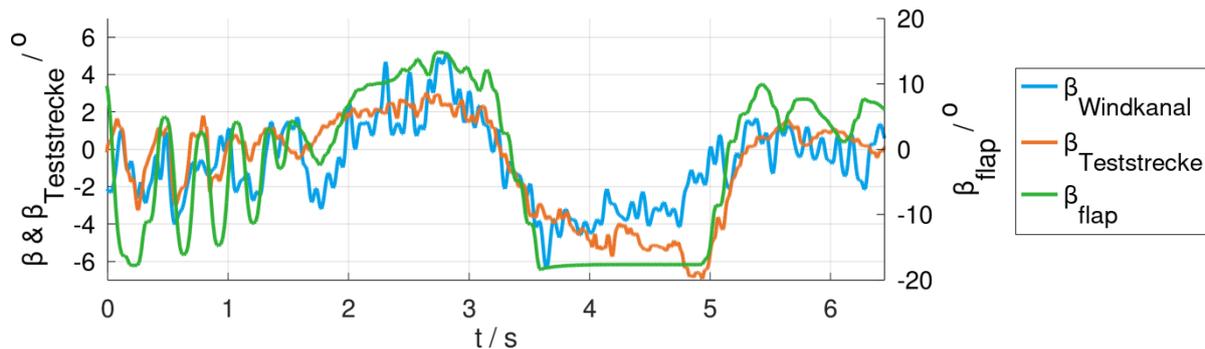


Abbildung 6-35: Nachbildung des Anströmwinkels für das Überholmanöver über die Zeit. Orange: Anströmwinkel $\beta_{\text{Teststrecke}}$ an der mittleren Sonde des Fahrzeugarrays (linke Achse); blau: Anströmwinkel $\beta_{\text{Windkanal}}$ an der mittleren Sonde des Arrays im Windkanal (linke Achse); grün: verwendeter Flapwinkel β_{flap} zur Simulation der Anströmung in Windkanal (rechte Achse).

In Abbildung 6-35 wurde zunächst nur zeitliche Veränderungen des Anströmwinkels an einer einzelnen Sonde in der Mitte des Arrays im Windkanal betrachtet. Jedoch ist auch die räumliche Verteilung der Anströmwinkel von Interesse. Im Folgenden wird daher analysiert, wie diese Verteilung für das Überholmanöver im Windkanal nachgebildet werden kann.

In Abbildung 6-36 ist die räumliche Verteilung des Anströmwinkels β während des Überholmanövers als Konturplot dargestellt. Positive Winkel sind in Rot dargestellt, negative Winkel in Blau und Winkel um 0° in Weiß. Der obere Konturplot stellt die Ergebnisse von der Teststrecke dar, der untere Konturplot stellt die Ergebnisse der Windkanalversuche dar. Die Winkel stammen aus den Messungen an den unteren Sondenpositionen des Arrays für die Versuche auf der Teststrecke (siehe Abbildung 4-5). Für die Versuche im Windkanal wurden die Messwerte an den Sondenpositionen des Windkanalarrays aufgenommen (siehe Abbildung 4-23). Die Sonden waren in beiden Fällen gleichmäßig in Querrichtung über die Fahrzeugbreite verteilt. Die Werte zwischen den Sondenpositionen wurden linear interpoliert. Die y-Achse gibt die Position in der Querrichtung y an. Die Umrechnung der mit 1:4 skalierten Modellversuche im Windkanal auf die 1:1-Werte mit dem Faktor 4 sind als y^* angegeben. Auf der x-Achse ist der Abstand Δx der Fahrzeugnase zum Heck des Transporters angegeben. Bei Δx handelt es sich um einen aus der Zeit und der Differenzgeschwindigkeit zwischen den beiden Fahrzeugen berechneten Abstand. Das genaue Vorgehen ist genauer in den Erläuterungen zu Abbildung 5-23 beschrieben. Die vier Phasen des Überholmanövers sind durch gestrichelte Linien voneinander abgegrenzt.

Wie bei den Fahrversuchen auf der Teststrecke, sind die 4 Phasen des Überholmanövers auch in der räumlichen Verteilung des Anströmwinkels für die Windkanalergebnisse vorhanden. Die 1. Phase (Fahrt im Nachlauf) weist für die am Fahrzeug ankommenden Strukturen bis $\Delta x = -30$ m nahezu konstante Winkel in Querrichtung auf. Dieses Verhalten wird im Windkanal gut nachgebildet. Die Unterschiede der Winkel in Querrichtung auf Grund des Austritts aus dem Nachlauf des vorherfahrenden Fahrzeugs in der 2. Phase werden im Windkanal nur mit Abweichungen nachgebildet. Ursache für die Unterschiede im Anströmwinkel ist vermutlich die begrenzte Anzahl von Flügeln in Querrichtung. Die 3. Phase (zwischen -10 m und 5 m) mit ihren charakteristischen großskaligen Strukturen während der Vorbeifahrt am Transporter wird im Windkanal wiederum gut nachgebildet. Die Abweichungen in der Amplitude ist, wie zuvor erwähnt, eine Folge der mechanischen Grenzen des Klappensystems. Die 4. Phase zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen Fahrversuchen und Windkanalversuchen. Es treten nur geringe Schwankungen um einen Winkel von 0° auf.

Mit dem Klappensystem der SWG können die räumlichen Anströmbedingungen aus den Fahrversuchen also gut nachgebildet werden.

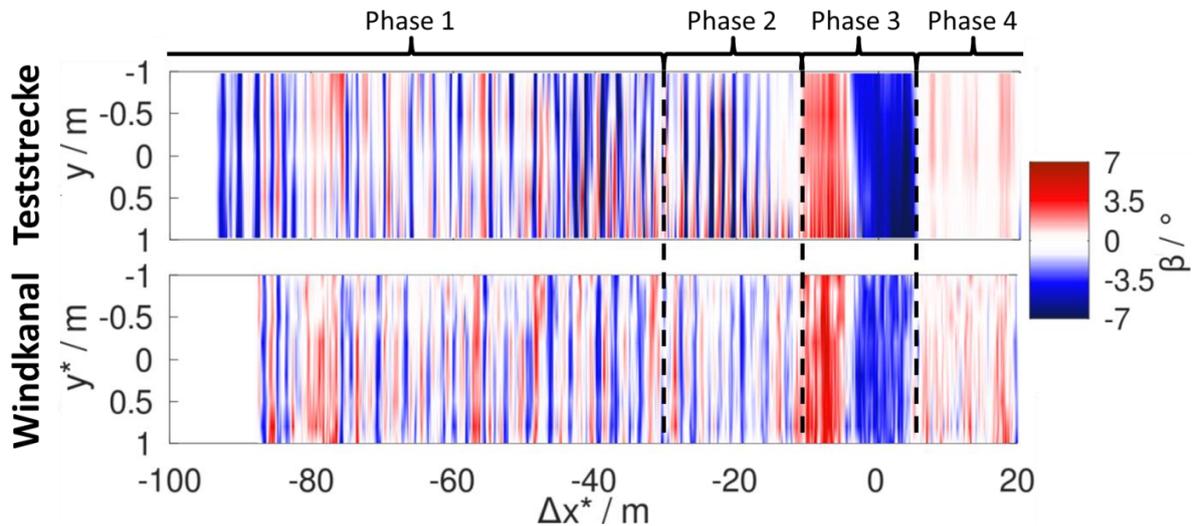


Abbildung 6-36: Entwicklung der Anströmwinkel während eines Überholmanövers in Querrichtung auf der Teststrecke (oben) und im Windkanal (unten, Längenmaße x^* und y^* auf die der Teststrecke skaliert) in Abhängigkeit des Abstands zum vorherfahrenden Transporter mit den 4 Phasen des Überholmanövers

6.4 Bestimmung der auf das 1:4-Modell wirkenden Kräfte für die Hinterherfahrt in der SWG

In Fahrversuchen ist es nicht möglich die Kräfte, die während der Hinterherfahrt auf das Fahrzeug wirken, direkt zu bestimmen. Dadurch, dass die wesentlichen Strömungsgrößen der Hinterherfahrt simulierbar sind, können direkte Messungen am 1:4-Fahrzeugmodell in der geschlossenen Messstrecke des Windkanals durchgeführt werden. Dies erlaubt die Bestimmung der Luftkräfte in unterschiedlichen Anströmsituationen und ermöglicht es beispielsweise die Effektivität von Bauteilen oder die Fahrzeugstabilität im Windkanal zu untersuchen.

6.4.1 Auswirkung der Anregungsform auf den Widerstandsbeiwert für die Hinterherfahrt

In Kapitel 6.3 wurden unterschiedliche Ansätze vorgestellt, um Strömungseigenschaften gezielt zu simulieren. So können beispielsweise die statistischen Größen der Turbulenzintensität und des integralen Längenmaßes aus der Hinterherfahrt über eine sinusförmige Anregungsfrequenz und den Ausschlag der Flaps mit optionalen passiven Turbulenzgeneratoren in der Anströmung erzeugt werden. Im Folgenden wird dies für in Phase bewegte Flaps diskutiert. Es wurden unter anderem auch Studien mit unterschiedlichen Phasenwinkeln zwischen den Flaps durchgeführt, jedoch variieren hier die Strömungsgrößen zum Teil deutlich über die Kanalbreite und dieser Ansatz wurde nicht weiterverfolgt. Auch der große passive Turbulenzgenerator führte in einigen Fällen zu ungewollten Störungen in der Strömung und wird daher nicht näher betrachtet. Die Vorversuche zeigten außerdem, dass der zeitliche Verlauf der Anströmwinkel für die Hinterherfahrt direkt simuliert werden kann. Im Folgenden wird zunächst eine Vorauswahl möglicher Anregungsszenarien für die Kraftmessungen diskutiert, die sich an den zu erzeugenden Größen für die Hinterherfahrt (siehe Tabelle 4-1) orientiert. Mit Hilfe der am Versuchsfahrzeug während der Hinterherfahrt gemessenen Drücke werden diese Ansätze dann validiert, bevor die Auswirkungen der Anströmung auf den Widerstandsbeiwert untersucht wird.

Übersicht möglicher Anregungsformen

Ziel der Untersuchungen war es, die Auswirkung der Anströmbedingungen auf das Fahrzeug – insbesondere der Kräfte – zu identifizieren. Eine Möglichkeit ist es, die in den Fahrversuchen gemessene Anströmung möglichst exakt nachzubilden. Auf Grund des damit verbundenen Aufwands besteht jedoch gleichzeitig auch ein Interesse daran, die Untersuchungen zu vereinfachen. Tabelle 5-5 zeigt eine Übersicht der Strömungsgrößen (z.B. f , L , T_u), die einen wesentlichen Einfluss auf die Beiwerte und Druckverteilung am Fahrzeug für die Fahrt hinter einem Transporter mit 50 m Abstand haben können. Im Folgenden soll untersucht werden, welche Anregungsform geeignet ist, die Anströmbedingungen und die Auswirkungen auf das Fahrzeug möglichst realitätsnah nachzubilden. Die Referenzen bilden die gemessenen Strömungsgrößen (z.B. das instationäre Strömungsfeld, dominierende Frequenzen, integrale Längenmaße, Turbulenzintensitäten) sowie die Oberflächendrücke und deren Schwankungen während der Hinterherfahrten auf der Teststrecke. Das komplexe Signal während der Hinterherfahrt in Bezug auf den zeitlichen Verlauf der Anströmwinkel wurde nachgebildet. Des Weiteren wurde untersucht ob auch Vereinfachungen zur Nachbildung der Strömung getroffen werden können ohne dass es zu signifikanten Abweichungen in den Ergebnissen kommt. Bei den vereinfachten Strömungen handelt es sich um sinusförmige Signale, mit denen unterschiedliche Strömungsgrößen der Hinterherfahrt (siehe Tabelle 5-5) nachgebildet wurden.

Als *Referenz* wird – wie für die klassischen Windkanalversuche üblich – eine Anströmung ohne aktives Klappensystem und ohne passive Turbulenzgeneratoren erzeugt. Die Strömung besitzt also eine niedrige Turbulenzintensität. Hierzu wird das Klappensystem statisch bei 0° gehalten. Der Einfluss einer sinusförmigen Anregung wird für maximale Flapwinkel von 10° bei einer Frequenz von 10 Hz ohne passive Turbulenzgeneratoren bestimmt (*Sinus-Par. 10 (ohne TG)*). Die Frequenz entspricht dabei der Frequenz des Maximums im Spektrum der Querkomponente v . Der gleiche Fall mit einem zusätzlichen, kleinen Turbulenzgenerator (*Sinus-Par. 10*) erlaubt eine höhere Turbulenzintensität von 4 %, die – wie bei der Hinterherfahrt – in x - und y -Richtung gleich ist. Das integrale Längenmaß L_x umgerechnet auf einen Maßstab von 1:1 beträgt wie bei der Hinterherfahrt 2 m. L_y kann nicht zeitgleich erreicht werden und beträgt 3 m. Das korrekte Längenmaß $L_y = 1$ m wird dafür im Fall *Sinus-Par. 20* erzeugt. Hier muss dann umgekehrt auf das korrekte Maß für L_x verzichtet werden. Zusätzlich steigt T_{u_y} in diesem Anregungsfall durch einen größeren Flapausschlag auf 6 %, wie bei der Hinterherfahrt, während T_{u_x} bei 4 % gehalten wird. Auf Grund einer Rückkopplung durch die Blockade der großen Turbulenzgeneratoren auf die zur Geschwindigkeitsbestimmung verwendeten Sonden im Windkanal, werden die Messergebnisse mit den großen Turbulenzgeneratoren hier nicht näher diskutiert – ein T_{u_x} von 4 % ist somit der maximal erreichbare Wert. Da die Zielwerte aus der Hinterherfahrt auf dem Testgelände für L_x und L_y nicht zeitgleich erreicht werden können (siehe Kapitel 5.2.3), wurde ein zusätzlicher Fall getestet, bei dem keines der Längenmaße den gewünschten Zielwert in L_x und L_y erreichte, aber die Werte für beide Raumrichtungen möglichst nah am realen Wert gewählt sind. Dieser Kompromissfall wird als *Sinus Par. 15* bezeichnet. Neben den sinusförmigen Bewegungen wird der Anströmwinkel aus der Hinterherfahrt über die Zeit simuliert. *HF-par.* entspricht dem Geschwindigkeitssignal der mittleren Sonde bei der Hinterherfahrt bei $z = 0,5$ m. Dabei ist der zeitliche Verlauf mit Hilfe der Gleichung (13) für eine konstante Strouhal-Zahl an die Bedingungen im Kanal angepasst. Die 4 Flaps werden für diese Anregungsform parallel bewegt. *HF-ind.* verwendet die Ergebnisse aus derselben Versuchsfahrt, jedoch werden die Geschwindigkeiten aller Sonden über die Breite an den Flaps berücksichtigt. Zur Erhöhung der Turbulenzintensität wird zusätzlich der kleine Turbulenzgenerator verwendet. *HF-Par. (2. Fahrt)* und *HF-Par. (Gegenrichtung)* entsprechen der Anregungsform *HF-Par.*, jedoch werden die Anströmwinkel

anderer Hinterherfahrten aus den Fahrversuchen genutzt. Bei *HF-Par (2. Fahrt)* wurde die Hinterherfahrt auf der Teststrecke zu einem anderen Zeitpunkt wiederholt, während bei *HF-Par. (Gegenrichtung)* die Fahrt in die entgegengesetzte Richtung (von West nach Ost) stattfand.

Die aufgeführten Anregungsformen wurden gewählt, da sie die erfolgversprechendsten Ansätze liefern, um unterschiedliche Strömungsparameter der Hinterherfahrt möglichst realistisch zu simulieren. Im Folgenden werden die in Tabelle 6-2 aufgelisteten Anregungsformen näher erläutert, indem die erzeugten Strömungseigenschaften und die hierfür angewendeten Parameter für das Klappensystem aufgelistet werden. Die in Tabelle 6-2 aufgeführten Anregungsformen werden im Folgenden genutzt, um den Einfluss unterschiedlicher Strömungen auf das Fahrzeug zu untersuchen. Die im Weiteren verwendeten Bezeichnungen für die Anregungsformen sind in der linken Spalte aufgeführt und werden im Text kursiv dargestellt.

Tabelle 6-2: Übersicht der näher untersuchten Anregungsfälle im Windkanal mit dem Modellfahrzeug (Maßstab 1:4). Fett und kursiv markierte Werte erreichen die Strömungseigenschaften aus der Hinterherfahrt bei einem Abstand von 50 m und einer Geschwindigkeit von 27,8 m/s auf der Teststrecke. (* - nur Kraftmessungen betrachtet).

Bezeichnung der Anregungsform	Strömungseigenschaften (in 1:1)	Parameter für Klappensystem
<i>Referenz</i>	$Tu_x = Tu_y = 0,5 \%$ $L_x = 2,6 \text{ m}$ $L_y = 1,4 \text{ m}$	Klappensystem statisch bei $\beta_{\text{flap}} = 0^\circ$
<i>Sinus-Par. 10 (ohne TG)</i>	$Tu_x = Tu_y = 1 \%$ $L_x = 2 \text{ m}$ $L_y = 3 \text{ m}$	Sinusförmige Flapbewegung ohne TG mit: $f_{\text{flap}} = 10 \text{ Hz}$ $\beta_{\text{flap}} = 10^\circ$ Parallele Flapbewegung
<i>Sinus-Par. 10</i>	<i>f_{flap} bei max. aus Spektrum</i> $Tu_x = Tu_y = 4 \%$ $L_x = 2 \text{ m}$ $L_y = 3 \text{ m}$	Sinusförmige Flapbewegung + TG (klein) mit: $f_{\text{flap}} = 10 \text{ Hz}$ $\beta_{\text{flap}} = 10^\circ$ Parallele Flapbewegung
<i>Sinus-Par. 15</i>	$Tu_x = 4 \%$ $Tu_y = 6 \%$ $L_x = 1,5 \text{ m}$ $L_y = 2,2 \text{ m}$	Sinusförmige Flapbewegung + TG (klein) mit: $f_{\text{flap}} = 15 \text{ Hz}$ $\beta_{\text{flap}} = 15,2^\circ$ Parallele Flapbewegung
<i>Sinus-Par. 20</i>	$Tu_x = 4 \%$ $Tu_y = 6 \%$ $L_x = 1,3 \text{ m}$ $L_y = 1 \text{ m}$	Sinusförmige Flapbewegung + TG (klein) mit: $f_{\text{flap}} = 20 \text{ Hz}$ $\beta_{\text{flap}} = 15,2^\circ$ Parallele Flapbewegung
<i>HF-par.</i>	$\beta(t, y) = \beta(t, y = 0 \text{ m})_{\text{HF}}$	$\beta_{\text{flap}}(t)$ mit paralleler Flapbewegung + TG (klein)
<i>HF-ind.</i>	$\beta(t, y) = \beta(t, y)_{\text{HF}}$	$\beta_{\text{flap}}(t)$ mit individueller Flapbewegung + TG (klein)
<i>HF-par. (2. Fahrt)*</i>	$\beta(t, y) = \beta(t, y = 0 \text{ m})_{\text{HF}}$	$\beta_{\text{flap}}(t)$ mit paralleler Flapbewegung + TG (klein)
<i>HF-par. (Gegenrichtung)*</i>	$\beta(t, y) = \beta(t, y = 0 \text{ m})_{\text{HF}}$	$\beta_{\text{flap}}(t)$ mit paralleler Flapbewegung + TG (klein)

6.4.2 Validierung der Drücke für die Hinterherfahrt mit den Ergebnissen von der Teststrecke

Aus Tabelle 6-2 geht hervor, dass die Hinterherfahrt – je nach Priorisierung – über sehr unterschiedliche Anströmbedingungen simuliert werden kann. Um herauszufinden, welcher Ansatz am geeignetsten ist und ob eventuell eine vereinfachte Nachbildung der Strömung ausreicht, werden im Folgenden die Ergebnisse der Windkanalversuche mit den Ergebnissen der Versuche auf der Teststrecke validiert. Die

Ergebnisse aus den Fahrversuchen auf der Teststrecke bieten die Möglichkeit einer direkten Validierung der Windkanalergebnisse für das Modell mit Hilfe der in der Realität auftretenden Druckwerte an den Druckbohrungen des Versuchsfahrzeugs. Es werden im Hinblick auf die instationären Anströmungen neben den mittleren Druckbeiwerten auch die instationären Druckverläufe und die Druckspektren für die Validierung betrachtet.

Vergleich der mittleren Druckbeiwerte

Zur Validierung der Ansätze im Windkanal werden zunächst die mittleren Druckbeiwerte an den Oberflächendruckbohrungen verwendet, da diese einen ersten, stationären Vergleich der Windkanalergebnisse mit den Versuchen auf der Teststrecke erlauben.

Abbildung 6-37 zeigt die mittlere Verteilung des Druckbeiwerts c_p (oben) und seiner Schwankung $c_{p,rms}$ (unten) an der y -Position der jeweiligen Druckbohrung. Die Druckbohrungen befanden sich an der vorderen (linke Abbildung) und hinteren Stoßstange (rechte Abbildung). Die schwarzen Markierungen und die schwarz-gestrichelte Linie spiegeln die Ergebnisse aus der Hinterherfahrt auf der Teststrecke bei 50 m Abstand und einer Geschwindigkeit von 27,8 m/s wieder. Bei den Werten von der Teststrecke handelt es sich um die gewünschte Zielgröße, die idealerweise in den Windkanalversuchen nachgebildet werden soll. Die farbigen Werte zeigen die Ergebnisse aus den Windkanalversuchen mit unterschiedlichen Bewegungsprofilen für die Flaps (vgl. Tabelle 6-2) zur Strömungsanregung. Die Positionen der Druckbohrungen am Fahrzeugmodell wurden für einen besseren Vergleich mit der Versuchsfahrt auf die y -Positionen y^* in 1:1 skaliert.

An der Fahrzeugfront stimmen die Druckbeiwerte für die instationären Anströmungen über die Breite gut überein (Abbildung 6-37, oben links). Der Wert des Druckmaximums von $c_p = 0,8$ aus der Hinterherfahrt wird dabei am besten von *Sinus-Par. 10* und *HF-Ind.* abgebildet. Die anderen Anregungsarten ergeben jedoch auch nur geringfügig kleinere Druckbeiwerte. Die lokalen Anstiege der Druckbeiwerte abweichend von den Versuchen auf der Teststrecke bei $y^* = \pm 450$ mm resultieren vermutlich aus der geschlossenen Motorraumgeometrie des Windkanalmodells.

Am Heck (Abbildung 6-37, oben rechts) zeigt sich nur eine geringe Veränderung des Druckbeiwerts über die Breite für alle Anregungsfälle im Windkanal. Im Vergleich zu den Versuchen auf der Teststrecke ist ein geringfügiger Abfall von ca. 0,05 zu beobachten. Vermutlich führt auch hier die veränderte Motorraumdurchströmung zu einer veränderten Unterbodenströmung, die wiederum den Druck am Heck beeinflusst. Die Druckverteilung am Heck ist vermutlich primär von der abgelösten Strömung bestimmt und wird kaum von den Anströmbedingungen beeinflusst. Bei einer weniger stark abgeschnittenen Fahrzeuggeometrie (z.B. Fließheck) könnte der Einfluss jedoch eventuell stärker sein.

Die Druckschwankungen an der Fahrzeugfront auf der Teststrecke (Abbildung 6-37, unten links) liegen fast über die gesamte Breite im Bereich von $c_{p,rms} \approx 10$ %. Die Druckschwankungen in der Mitte werden bei allen instationären Windkanalversuchen gut simuliert. Unterschiede treten jedoch zu den Seiten hin auf. Während insbesondere *HF-Ind.* und *Sinus-Par. 10* die Hinterherfahrt über die Breite gut abbilden, zeigen *Sinus Par. 15* und *20* fast 50 % höhere Druckschwankungen an den Seiten der Fahrzeugfront. *HF-Ind.* ist über den größten Teil der Breite, was die Druckschwankungen betrifft, zu niedrig. Eine Ursache könnte die größere Kohärenz der sinusförmigen Strömung sein, die auf Grund ihrer großskaligen Strukturen über die Kanalbreite einen größeren Einfluss auf das Fahrzeug in diesem Bereich hat als weniger kohärente Strukturen, wie sie beispielsweise bei *HF-Ind.* auftreten (siehe auch Abbildung 6-34).

Am Fahrzeugheck (Abbildung 6-37, unten rechts) sind die Unterschiede – mit Ausnahme der Referenz – nicht so signifikant. In der Mitte treten nur geringfügige Abweichungen in den Druckschwankungen

auf. In den äußeren Bereichen weichen *Sinus Par. 15* und *20* stärker als die übrigen Windkanalmessungen von den Schwankungen der Teststrecke ab.

Es bestätigt sich, dass die Anregungsform einen Einfluss auf die Verteilung der Druckbeiwerte und insbesondere deren Schwankungen hat. Die besten Übereinstimmungen wurden mit den Anregungsfällen *Sinus-Par. 10* und *HF-Ind.* erzielt. Daher werden im Nachfolgenden diese beiden Fälle näher betrachtet.

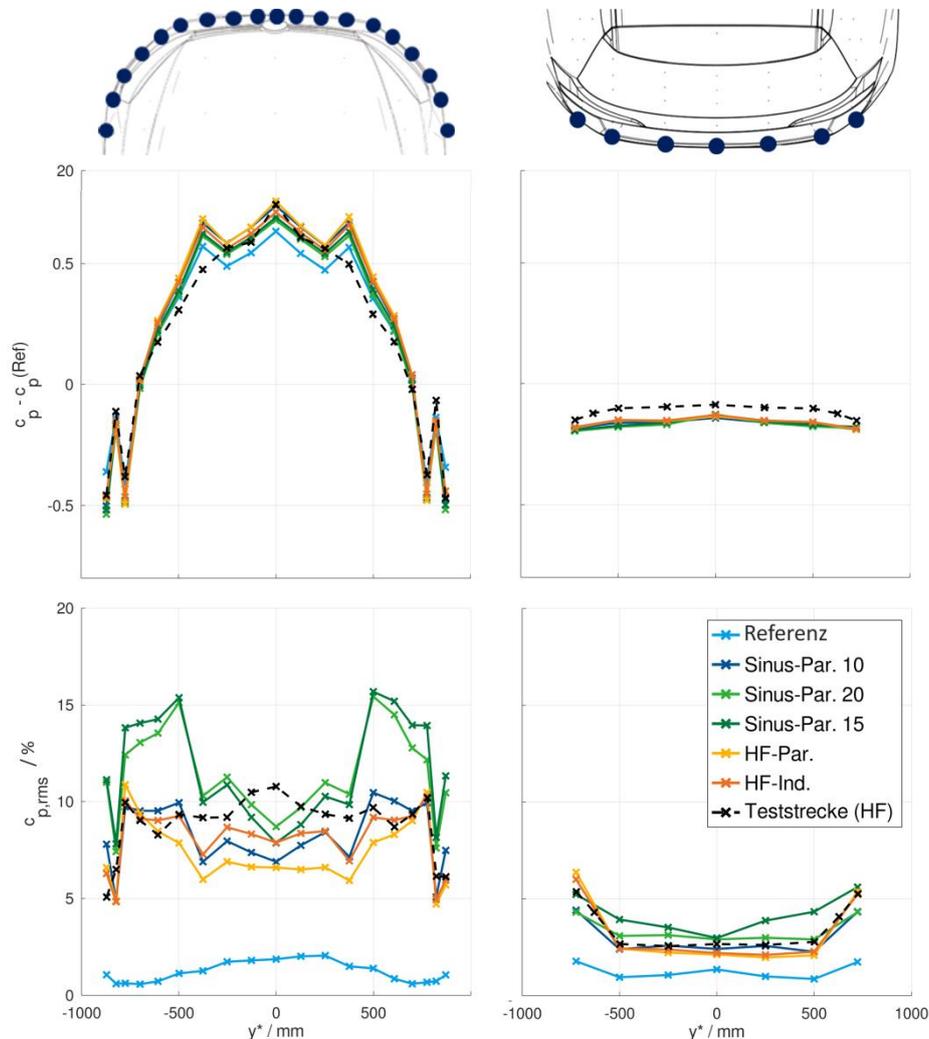


Abbildung 6-37: Verteilung der Druckbeiwerte c_p (oben) und deren Schwankung $c_{p,rms}$ (unten) über die Breite der Stoßstange an der Front (links) und am Heck (rechts) für unterschiedliche Anströmbedingungen im Windkanal (farbige Verläufe) und für die Hinterherfahrt bei 50 m Abstand und einer Geschwindigkeit von $v_A = 27,8$ m/s (schwarz). y^* entspricht den auf 1:1 umgerechneten Druckpositionen in Querrichtung.

Vergleich der instationären Druckfelder

Neben den mittleren statistischen Eigenschaften der Drücke soll auch der zeitliche Verlauf der Oberflächendrücke untersucht werden. Wie für die Hinterherfahrten auf der Teststrecke gezeigt, können die zeitlichen Verläufe, trotz ähnlicher statistischer Eigenschaften, Unterschiede aufweisen. Daher ist es von Interesse, ob auch die zeitlichen Verläufe zuverlässig nachgebildet werden können.

Abbildung 6-38 zeigt die Schwankung des Druckbeiwerts c_p' an der Front- (oben) und Heckstoßstange (unten) des Fahrzeugs über einen exemplarischen Zeitausschnitt von einer Sekunde. Links ist die Schwankung für eine Hinterherfahrt auf der Teststrecke, in der Mitte die Schwankung im Windkanal

mit der *HF-Ind.*-Anregung und rechts mit der *Sinus-Par. 10* Anregung dargestellt. Auch hier wurden die Zeit- und Längenskalen für die Versuche am Windkanalmodell auf 1:1 umgerechnet.

Für die Hinterherfahrt auf der Teststrecke ist an der Fahrzeugfront ein zusammenhängendes Feld positiver Druckschwankung zu erkennen, das sich zwischen der linken und rechten Fahrzeughälfte ändert. Dieses Verhalten deutet den Einfluss der in Kapitel 5.2.1 angesprochenen Frequenz in Strömungsquerrichtung an. In y-Richtung erstrecken sich die positiven Druckschwankungen mindestens über die Hälfte des Fahrzeuges, in der Regel jedoch noch weiter über die Fahrzeugmitte hinaus. Die Bereiche niedrigeren Drucks befinden sich dabei auf der windabgewandten Seite.

Die Druckverteilung am Windkanalmodell für *HF-Ind.* zeigt ähnliche Amplituden für die Schwankungen wie die Hinterherfahrt auf der Teststrecke. Auch hier deutet sich eine Periodizität in den Schwankungen des Druckanstiegs von links nach rechts an. Auch im Windkanalversuch erstrecken sich diese Gebiete zum Teil über mehr als die Hälfte der Fahrzeugfront. Allerdings sind die Strukturen weniger deutlich zusammenhängend als auf der Teststrecke.

Auch die Schwankungen der Anregungsform *Sinus-Par. 10* liegen in einem ähnlichen Bereich von $\Delta c_p' = 0,3$ wie die anderen beiden Anregungsformen. Das periodische Verhalten ist jedoch wesentlich deutlicher an klar abgegrenzten Druckschwankungen über die Zeit und Breite zu erkennen.

Ein Vergleich mit den Korrelationen in den Anströmungen (Abbildung 6-34) zeigt, dass hohe, periodische Korrelationskoeffizienten in der Breite, wie bei *Sinus-Par. 10*, zu gegenläufigen Druckschwankungen um die Mittellinie am Fahrzeug führen. Den Kontrast hierzu bildet die Hinterherfahrt auf der Teststrecke mit einer niedrigeren, aber noch immer hohen Korrelation in Querrichtung ohne Abgrenzung zwischen der linken und rechten Seite. Bei der Anregungsform *HF-Ind.* liegt die Korrelation zwischen den beiden zuvor genannten Fällen. Es ist noch ein Unterschied zwischen der linken und rechten Seite zu erkennen, dieser fällt jedoch nicht so deutlich aus wie für *Sinus-Par. 10*. Des Weiteren zeigt *Sinus-Par. 10* sowohl in den Drücken als auch in der Korrelation eine Periodizität. Diese ist in den Korrelationen und den Signalen der Druckschwankungen von *HF-Ind.* und dem Signal der Teststrecke deutlich weniger stark ausgeprägt. Eine gute Nachbildung der real auftretenden Korrelation in der Anströmung verbessert die Druckverteilung also deutlich.

Am Fahrzeugheck treten geringere Schwankungsamplituden im Vergleich zur Front auf. Die Amplituden der Schwankungen liegen auch hier für alle 3 Fälle in ähnlichen Bereichen. Die Schwankungen für *Sinus-Par. 10* weisen am Heck wieder eine deutliche Periodizität auf. Dabei bildet sich ein gegenläufiger Trend zwischen der linken und rechten Fahrzeughälfte aus. Im Gegensatz hierzu weisen die im Fahrversuch und bei Anregung *HF-Ind.* im Windkanal gemessenen Druckschwankungen weder eine deutliche Periodizität noch eine deutliche Trennung zwischen der linken und rechten Fahrzeughälfte auf.

Es zeigt sich, dass die Form der Anströmung einen deutlichen Einfluss auf die Druckverteilung an der die Fahrzeugfront und dem Fahrzeugheck hat. Die im Windkanal erzeugten Anregungsformen *HF-Ind.* und *Sinus-Par. 10* erreichen die Amplituden der in den Fahrversuchen auf der Teststrecke gemessenen Druckschwankungen, jedoch ergeben sich bei der periodischen Anregung *Sinus-Par. 10* andere Druckverteilungen am Fahrzeug, die deutlich die sinusförmige Anregungsform widerspiegeln. So treten periodische Druckschwankungen auf, die durchgängig eine erkennbare Abtrennung zwischen der linken und rechten Fahrzeughälfte aufweisen. Diese periodischen Strukturen sind in den auf der Teststrecke gemessenen Druckschwankungen und den Druckschwankungen für die Anregung mit *HF-Ind.* – insbesondere am Heck – nicht vorhanden. Obwohl bei der Anregung *HF-Ind.* Druckverläufe am Modell erzeugt werden die nicht mit jenen am Fahrzeug auf der Teststrecke übereinstimmen, liegen die Druckverläufe in Querrichtung und in der Zeit wesentlich näher an den Verläufen aus den Fahrversuchen, als

die bei Anregung mit *Sinus-Par 10* erzeugten Druckverläufe. Die Anregungsform *HF-Ind.* bildet die Druckverteilung von der Teststrecke also realitätsnäher nach.

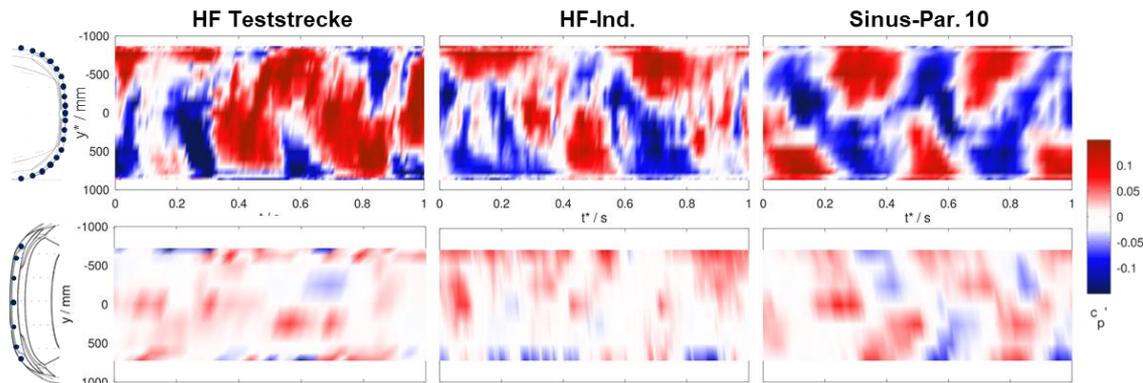


Abbildung 6-38: Zeitlicher Verlauf von c_p' über die Front- (oben) und Heckstoßstange (unten) am Versuchsfahrzeug für die Hinterherfahrt auf der Teststrecke (links) und am Fahrzeugmodell im Windkanal mit den Anregungen *HF-Ind.* (Mitte) und *Sinus-Par. 10*. y^* und t^* entsprechen den auf 1:1 skalierten Werten.

Abbildung 6-39 zeigt einen noch detaillierten Ausschnitt des zeitlichen Verlaufs der Druckschwankungen an drei ausgewählten Punkten an der vorderen (oben) und hinteren (unten) Stoßstange. Die Druckschwankungen auf der linken Seite sind jeweils in Blau dargestellt, die auf der rechten Seite in Gelb und die Schwankungen in der Mitte in Grün. Die Signale von der Teststrecke sind wieder links aufgetragen, die Anregungsformen im Windkanal in der Mitte für *HF-Ind.* und rechts für *Sinus-Par. 10*.

Die in den Fahrversuchen auf der Teststrecke und bei Anregung *HF-Ind.* im Windkanal an der Fahrzeugfront gemessenen Druckschwankungen sind in einem weiten Bereich ähnlich. Die Anregungsform *Sinus-Par. 10* weist hingegen eine größere Amplitude und ein deutliches sinusförmiges Verhalten in den Druckschwankungen mit gegenläufigem Signal zwischen der linken und rechten Seite auf.

Am Heck sind wieder die deutlich geringeren Amplituden gegenüber der Front zu erkennen. Auch hier weisen die im Fahrversuch auf der Teststrecke und bei Anregung *HF Ind.* im Windkanal gemessenen Größen einen ähnlichen Schwankungsbereich auf, während die Anregungsform *Sinus-Par. 10* zu größeren Amplituden in der Schwankung führt. Die Schwankungen für *Sinus-Par. 10* zeigt auch hier wieder ein sinusförmiges Verhalten.

Abbildung 6-38 und Abbildung 6-39 zeigen, dass *HF-Ind.* auf Grund vieler Gemeinsamkeiten mit den – bei der Hinterherfahrt auf im Fahrversuch auf Teststrecke – gemessenen Drucksignalen am besten für eine Nachbildung der instationären Druckschwankungen bei der Hinterherfahrt im Windkanal geeignet ist. So ist an den zeitlichen Verläufen der Schwankungen zu erkennen, dass sowohl die räumlichen als auch zeitlichen Verteilungen der Drücke gut simuliert werden. Des Weiteren liegen die Amplituden der Schwankungen in ähnlichen Bereichen. Die sinusförmige Anregungsform *Sinus-Par. 10* weist hingegen zum Teil zu große Amplituden und deutliche periodische Strukturen in der Druckschwankung auf, die in dieser idealisierten Form im Fahrversuch auf der Teststrecke nicht beobachtet wurde.

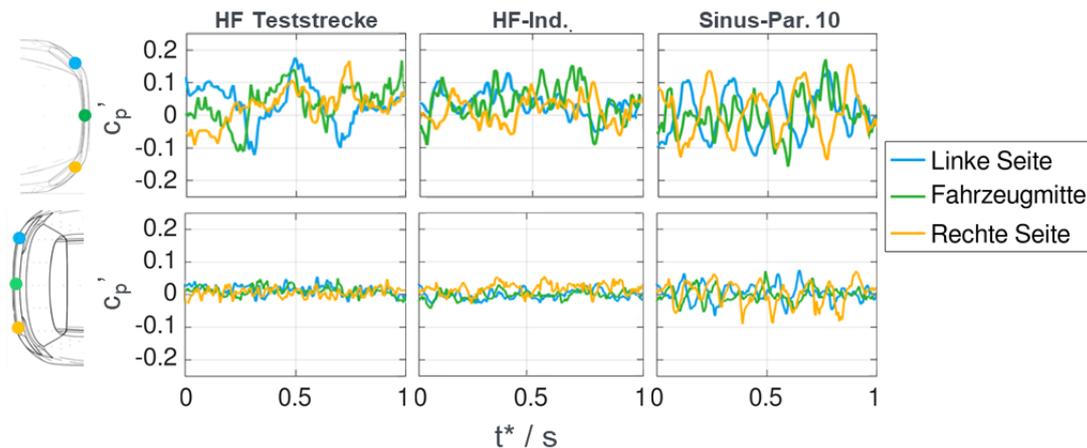


Abbildung 6-39: Zeitliche Druckverläufe für 3 Druckbohrungen (linke Bohrung: blau; rechte Bohrung: gelb; mittlere Bohrung: grün) an der Front- und Heckstoßstange bei unterschiedlichen Anströmbedingungen (links: Hinterherfahrt auf der Teststrecke; Mitte: Anregungsform *HF-Ind.* im Windkanal; rechts: Anregungsform *Sinus-Par. 10* im Windkanal). Die Zeit der Windkanalversuche wurde auf die Zeit der 1:1 Versuche skaliert.

Vergleich der Druckspektren

Mit Hilfe der Spektren soll untersucht werden, ob die Energieverteilung der Fahrversuche in den Windkanalversuchen ähnlich ist, oder ob mit dem Klappensystem – je nach Anregungsform – die Verteilung verzerrt wird.

Abbildung 6-40 zeigt die Spektren unterschiedlicher Drucksignale an der Fahrzeugfront für einen Frequenzbereich bis 10 Hz. Die grünen Kurven geben die in der Fahrzeugmitte gemessenen Werte wieder. Die blauen Kurven verwenden die Druckverläufe an einer Messstelle an der linken Fahrzeugseite und die gelben Kurven basieren auf den Verläufen an einer Messstelle an der rechten Fahrzeugseite. Die schwarz-gestrichelte Linie deutet den Verlauf für das Kolmogorov-5/3-Gesetz an. Die Ergebnisse aus der Hinterherfahrt auf der Teststrecke sind wieder links dargestellt. Die Anregungen im Windkanal mit den Anregungsformen *HF-Ind.* und *Sinus-Par 10* sind mittig bzw. rechts aufgetragen. Auch hier wurde die Frequenz f aus den Windkanalversuchen in die äquivalente Frequenz f^* in 1:1 umgerechnet.

Ähnlich wie bei den Spektren der Geschwindigkeitskomponenten der Hinterherfahrt (siehe Abbildung 5-16) steigt die turbulente kinetische Energie des im Fahrversuch auf der Teststrecke gemessenen Signals zunächst bis zu einer Frequenz von 2,5 Hz an. Der Bereich bis 5 Hz ist bei der Hinterherfahrt dabei der energietragende Injektionsbereich der turbulenten Strömung. Ab 5 Hz fällt die Energie im Druckspektrum dann ansatzweise nach dem Kolmogorov-5/3-Gesetz ab, hier setzt also der Wirbelzerfall ein (Inertialbereich).

Die Anregungsform für *HF-Ind.* weist eine ähnliche Energieverteilung an den jeweiligen Druckbohrungen auf. Zwar wird auf Grund der Skalierung der Bereich um das Maximum nicht ganz so detailliert aufgelöst wie bei den Messungen auf der Teststrecke, dennoch tritt auch hier das Maximum bei etwa 2,5 Hz auf. Für beide Messungen (Fahrversuch und Windkanal) liegen die ermittelten Energien in dem Bereich zwischen 100 und 300 Pa²/Hz. Auch bei der Anregungsform *HF-Ind.* nimmt die spektrale Energie für Frequenzen > 5 Hz mit $S(p) \sim f^{-5/3}$ ab. Das Signal an der mittleren Sonde weicht allerdings etwas von den Signalen an den anderen Druckbohrungen ab. Die Energieabnahme findet im betrachteten Bereich erst bei höheren Frequenzen. Es ist zu vermuten, dass die Lage des Messpunkts zwischen den beiden mittleren Flügeln dazu führt, dass hier kleinere Strukturen nicht ungestört an der Messstelle ankommen.

Bei einer sinusförmigen Anregung treten auf der linken und rechten Seite scharf abgegrenzte Maxima bei der Anregungsfrequenz der Flaps (2,5 Hz) in den Druckspektren auf. In der Mitte tritt ein Maximum bei der doppelten Frequenz auf. Innerhalb einer Periode ist die linke bzw. rechte Seite einmal windzugewandt und einmal windabgewandt. Das heißt, die Anströmungen und somit auch die Drücke unterscheiden sich, wenn die Strömung von der linken oder von der rechten Seite auf das Fahrzeug trifft. In der Fahrzeugmitte gibt es auf Grund der Symmetrie in Bezug auf den Druck jedoch keinen Unterschied zwischen linker und rechter Anströmung beim Richtungswechsel. Das Drucksignal erfährt also pro Periode in der Strömung zweimal das gleiche Signal und hat daher die doppelte Frequenz. Auffällig sind auch die Nebenmaxima an den höher harmonischen Frequenzen, die bereits im Inertialbereich mit dem typischen $-5/3$ -Abfall auftreten.

Im Spektrum zeigt sich besonders deutlich, wie unterschiedlich sich die Anströmungen im Windkanal auswirken. Das Druckspektrum der *HF-Ind.* bildet den Verlauf des Spektrums von der Teststrecke gut nach. Die Amplituden stimmen gut überein und auch das Maximum tritt bei der gleichen Frequenz auf. *Sinus-Par. 10* ist hingegen nicht gut geeignet, um das Spektrum zu simulieren, da das Maximum in seiner Frequenz und Amplitude zu deutlich ausgeprägt ist, während der Rest des Signals zu niedrige Werte aufweist.

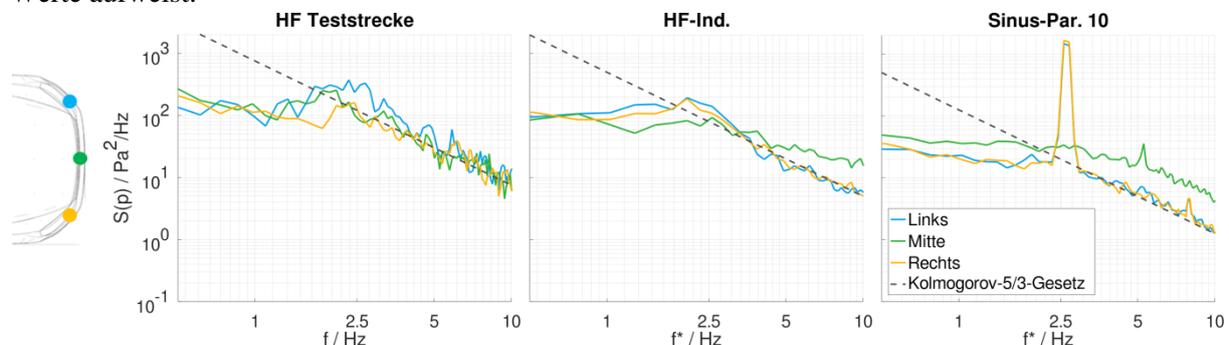


Abbildung 6-40: Spektrum des Drucksignals der Hinterherfahrt auf der Teststrecke (links) und der Windkanalversuche mit der Anregung *HF-Ind.* (Mitte) und *Sinus-Par. 10* (rechts) für die linke (blau) und rechte (gelb) Seite an der Frontstoßstange und für deren Mitte (grün). (f^* : Frequenzen der Windkanalversuche auf die Frequenzen der 1:1-Versuchsbedingungen von der Teststrecke umgerechnet).

Widerstandsbeiwerte für unterschiedliche Anregungsformen

Die Windkanalmessungen wurden durchgeführt, um die Auswirkung der Anströmung auf den Widerstandsbeiwert zu ermitteln. Eine analoge Kraftmessung war im Fahrversuch nicht möglich. Daher muss die Anströmung weitestgehend über einen Vergleich der Druckverteilung validiert werden. Die Validierung über die Drücke am Fahrzeug für die verschiedenen Anregungsformen zeigt, dass die Anströmung sehr unterschiedliche Auswirkungen auf die instationären Drücke hat. Dies könnte sich folglich auch deutlich auf die Beiwerte auswirken. Im Folgenden soll nun evaluiert werden, ob die Variation der Anregungsformen auch zu signifikanten Änderungen im Widerstandsbeiwert führt.

Neben der Gleichung zur Berechnung der Widerstandsbeiwerte (Gleichung (1)) wird zusätzlich eine Korrektur nach Mercker [89] angewendet. Diese Korrektur ist auf Grund des – mit der geschlossenen Messstrecke einhergehenden – Blockade-Effekts nötig. In den vorherigen Kapiteln wurde gezeigt, dass die instationäre Druckverteilung am Fahrzeug am besten durch die Anregungsform *HF-Ind.* simuliert wird. Um zu prüfen, ob die Widerstandsbeiwerte eventuell auch durch andere, gegebenenfalls einfacher zu realisierende Anregungsformen gut abbildbar sind, werden für die Untersuchungen auch wieder die anderen Ansätze aus Tabelle 6-2 berücksichtigt. Neben den experimentellen Versuchen zur instationären Anströmung wird ein quasi-statischer Fall *HF-Quasistatisch* eingeführt. Der Widerstandsbeiwert

wird dabei ähnlich zum *wind averaged drag* (siehe Gleichung (14)) berechnet. Als Grundlage wird jedoch das Zeitsignal aus den Arraymessungen der Fahrversuche für den Anströmwinkel β verwendet und – anstatt den c_w -Wert in einer Zuordnungstabelle nachzuschlagen – wird dieser Wert mit Hilfe einer Näherungsformel berechnet. Das Zeitsignal enthält bereits die benötigten Anströmwinkel und durch die Häufigkeit der Winkel im Zeitverlauf ist die Gewichtung bereits gegeben. Zu jedem Zeitpunkt wird jetzt gemäß dem Anströmwinkel ein statischer c_w -Wert berechnet. Als Stützstellen für die mathematische Annäherung dienen die statischen c_w -Werte, die in 1° -Schritten für den Anströmwinkel zwischen -4° und 4° ermittelt werden. Dazu wird die Anströmung durch einen entsprechenden statischen Flapausschlag beeinflusst. In Abbildung 6-41 sind die in der SWG gemessenen Widerstandsbeiwerte über die zugehörigen statischen Anströmwinkel aufgetragen (blaue Markierungen). Der Verlauf kann durch ein Polynom 2. Grades (schwarz-gestrichelte Linie) angenähert werden. Die Abweichung an den Stützstellen war kleiner als die Messgenauigkeit ($\Delta c_{w,\max} = 0,0005$). Über das Zeitsignal $\beta(t)$ kann nun mit Hilfe des Polynoms ein mittlerer, quasi-statischer c_w -Wert (HF-quasistatisch) bestimmt werden.

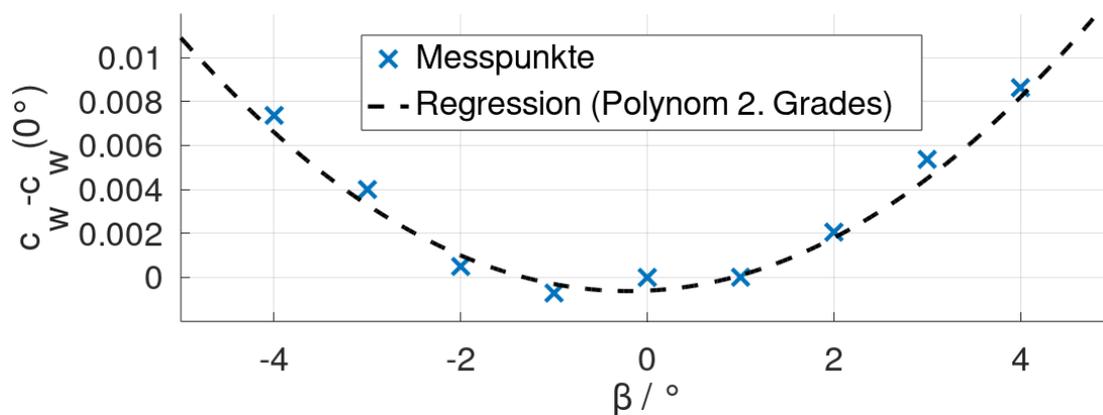


Abbildung 6-41: Verlauf des Widerstandsbeiwerts c_w in Abhängigkeit vom Anströmwinkel β für statische Kraftmessungen in der SWG mit dem Klappensystem (blaue Markierungen) und Regression durch ein Polynom 2. Grades (schwarz gestrichelte Linie).

Abbildung 6-42 zeigt die Veränderung der mittleren Widerstandsbeiwerte Δc_w gegenüber der Referenz für die in Tabelle 6-2 präsentierten Anregungsfälle ($\Delta c_w = c_w - c_{w,\text{Referenz}}$). Der Widerstandsbeiwert der Referenz beträgt für diese Messungen $c_{w,\text{Referenz}} = 0,288$. Die Referenzmessung erfolgte mit Flaps in einer 0° -Stellung und somit in einer stationären Anströmung. Alle anderen Messungen erfolgten mit bewegten Flaps und somit unter instationären Anströmbedingungen mit zeitlich veränderlichen Anströmwindeln. Die Änderungen der Widerstandsbeiwerte Δc_w sind für alle instationären Anregungsformen positiv. Die Widerstandsbeiwerte sind bei instationärer Anströmung also größer als im Referenzfall. Dabei ergeben sich 2 Abstufungen. Die sinusförmigen Flapbewegungen (im Folgenden werden die Variationen dieser Anregungsformen allgemein zusammenfassend mit *HF Sinus-Par.-xx* bezeichnet) führen zu einem geringeren Anstieg des Widerstandsbeiwertes als die Bewegung mit den von den Messungen auf der Teststrecke abgeleiteten Anregungen (im Folgenden werden die Variationen dieser Anregungsformen allgemein zusammenfassend mit *HF-xx* bezeichnet) folgt.

Der Vergleich von *Sinus-Par. 10* mit und ohne Turbulenzgenerator zeigt, dass die zusätzliche Turbulenzintensität in x-Richtung zu einer Erhöhung des Widerstandsbeiwertes von 0,002 auf 0,005 gegenüber der Referenz führt. Der Einfluss des integralen Längenmaßes wird wiederum beim Vergleich der Anregungsformen *Sinus-Par. 15* und *Sinus-Par. 20* deutlich. Das kürzere Längenmaß bei der Anregungsform *Sinus-Par. 20* führt zu einer Widerstandsänderung von $\Delta c_w = 0,004$ gegenüber einem Wert von 0,002 bei einer Anregung mit *Sinus-Par. 15*.

Während die Änderung des Widerstandsbeiwerts zwischen den unterschiedlichen sinusförmigen Anregungsformen gering ist, führt eine Anregungsform – basierend auf dem während im Fahrversuch auf der Teststrecke bei der Hinterherfahrt gemessenen Anströmwinkel – zu einem deutlichen Anstieg im Widerstandsbeiwert gegenüber der Referenz und den sinusförmigen Anregungsformen. So ist die Erhöhung des Widerstandsbeiwerts um 0,010 und 0,012. Sowohl nach Anregungen basierend auf einer 2. Versuchsfahrt (*HF-Par. (2. Fahrt)*) als auch auf einer Fahrt in Gegenrichtung (*HF-Par. (Gegenrichtung)*) werden nahezu identische Widerstandsbeiwerte gemessen. Auch die individuelle Flapbewegung (*HF-Ind.*) führt nur zu einer geringen Veränderung des Widerstandsbeiwerts gegenüber der parallelen Flapbewegung (*HF-Par.*). Der geringe Unterschied im mittleren Widerstand zwischen den Anströmungen mit den Anregungsformen von *HF-Par.*, *HF-Par. (2. Fahrt)* und *HF-Par. (Gegenrichtung)* liegt vermutlich sowohl an der guten Reproduzierbarkeit des Versuches auf der Messstrecke als auch daran, dass sich die Anströmung der Hinterherfahrt statistisch stationär verhält – sich also definierte Mittelwerte für die Anströmung über die Länge der Versuchsfahrten ergaben.

Die geringen Unterschiede zwischen den sinusförmigen Anregungsformen untereinander und den Anregungsformen von der Teststrecke untereinander deuten darauf hin, dass die allgemeine Wahl der Anregungsform einen deutlichen größeren Einfluss auf den Widerstandsbeiwert hat als eine Variation der Anregungsformen mit ähnlichem Verlauf.

Auch der quasi-statische Ansatz *HF-Quasistatisch* führt zu einem erhöhten Widerstandsbeiwert von $\Delta c_w = 0,006$. Der berechnete Widerstandsbeiwert liegt somit minimal über den sinusförmigen Anregungsformen, jedoch noch deutlich unter den Widerstandsbeiwerten, die mit den Anregungsformen *HF-xx* ermittelt wurden. Eine grobe Abschätzung über die quasi-statische Methode ist zwar möglich, es kommt aber zu Abweichungen im Bereich von $\Delta c_w \approx 0,005$ gegenüber den Anströmungen mit *HF-* Anregungsformen.

Die Vergleiche der mit unterschiedlichen Anregungsformen erzeugten, instationären Anströmbedingungen zeigen, dass diese generell zu einer Erhöhung der Widerstandsbeiwerte führen. Die Anregungsformen mit realistischer Anströmung (*HF-Ind.* und *HF-Par.*) liefern nahezu gleiche Ergebnisse für den Widerstandsbeiwert. Die generischen Anregungsformen mit sinusförmigem Verlauf führen zu deutlich geringeren Anstiegen im Widerstand gegenüber der Referenz. Die Anregungsform hat also einen wesentlichen Einfluss auf den Widerstandsbeiwert. Wie in den Kapiteln 6.3.3 und 0 gezeigt, wird die Anströmung von der Teststrecke und die Druckverteilung am Fahrzeug für die Hinterherfahrt am besten von der Anregungsform *HF-Ind.* nachgebildet. Auf Grund dieser Ähnlichkeiten in $\beta(t)$ und c_p am Fahrzeug folgt, dass die Widerstandsbeiwerte für diesen Fall am realistischsten abgebildet werden.

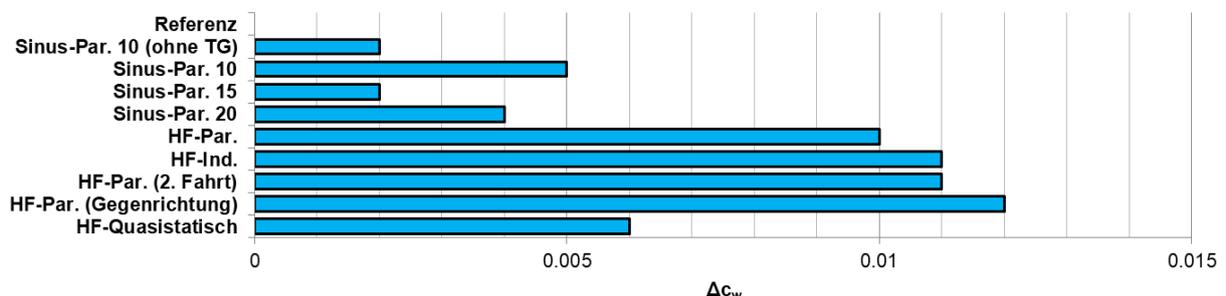


Abbildung 6-42: Veränderung der Widerstandsbeiwerte gegenüber der Referenz bei unterschiedlichen Anregungsbewegungen mit dem Klappensystem.

Neben dem mittleren Widerstandsbeiwert kann – analog zu den Drücken und zur Anströmung – auch die statistische Schwankung in Form der Standardabweichung herangezogen werden, um die Schwan-

kungsgröße des Widerstandsbeiwertes zu bestimmen. Eine niedrige Standardabweichung ist ein Indikator dafür, dass das Fahrzeug eine eher kontinuierliche Krafteinwirkung erfährt, während eine hohe Standardabweichung ein Indiz dafür ist, dass sich die Kräfte und somit auch Drücke an der Oberfläche über die Zeit deutlich ändern können.

Abbildung 6-43 zeigt die Standardabweichungen für die unterschiedlichen Anregungsbewegungen mit dem Klappensystem. Alle Strömungen mit instationärem Anregungsformen zeigen eine erhöhte Standardabweichung, was auf eine größere Schwankungsbewegung in der Strömung und im Druck im Vergleich zur Referenz schließen lässt. Die geringste Steigerung gegenüber der Referenz findet mit den sinusförmigen Flapbewegungen statt. Die größten Standardabweichungen treten mit den realistischen Hinterherfahrtsignalen auf. Die quasi-statische Berechnung führt zu einer Standardabweichung, die etwas unter den Werten der sinusförmigen Anregungsformen liegt.

Es zeigt sich also auch für die Schwankungen des Widerstandsbeiwertes in Form der Standardabweichung, dass die realistischen Anregungsformen *HF* die größten Werte aufweisen und sich in ihren Schwankungsgrößen deutlich von den Schwankungsgrößen der anderen Anregungsformen abheben. Deswegen ist es auch hier sinnvoll, das Hinterherfahrtsignal direkt zu simulieren, um die größeren Änderungen in der Strömung über die Zeit und somit in der Kraft zu berücksichtigen und zu erfassen.

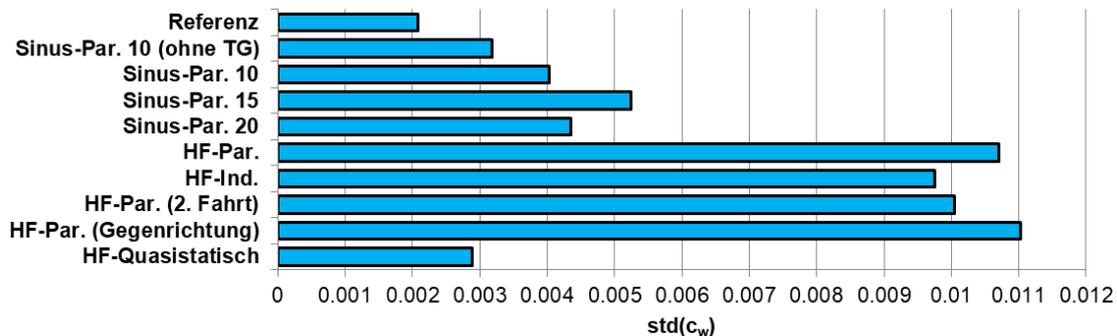


Abbildung 6-43: Veränderung der Standardabweichung für die Widerstandsbeiwerte gegenüber der Referenz bei unterschiedlichen Anregungsbewegungen mit dem Klappensystem.

Wie in Kapitel 5.2.1 gezeigt, waren die Anströmgeschwindigkeiten geringer als die Fahrgeschwindigkeit. Für die Hinterherfahrt bei einer Geschwindigkeit von $v_F = 27,8$ m/s mit 50 m Abstand zum Transporter war dieses Verhältnis $v_A/v_F = 0,9$. Der Einfluss der 10 % geringeren Anströmgeschwindigkeit gegenüber der Fahrgeschwindigkeit wurde bei den Berechnungen von c_w nicht berücksichtigt. Der reale Widerstand wird daher zusätzlich nochmal deutlich durch die veränderte Geschwindigkeit reduziert. Um eine erste Abschätzung der Auswirkung einer geringeren Geschwindigkeit vorzunehmen, kann der Widerstandsbeiwert mit der Geschwindigkeit bzw. einer reduzierten Geschwindigkeit multipliziert werden. Abbildung 6-44 zeigt die Ergebnisse für $c_w \cdot u^2$ bei unterschiedlichen Anregungsformen in der Strömung. Die im Windkanal gemessenen Werte sind in Rot dargestellt bzw. als gestrichelte Linie für den Referenzwert von $259,2$ (m/s)². Die Ergebnisse für eine um 10 % geringere Anströmgeschwindigkeit (geschätzte Werte) sind in Blau dargestellt. Oben sind die Ergebnisse für die *Referenz* dargestellt, in der Mitte die Ergebnisse für *Sinus-Par. 10* und unten für *HF-Ind.*

Bei der reduzierten Geschwindigkeit ergeben sich in allen Fällen kleinere Werte gegenüber der Referenz. Der Widerstand wird also – unter der Annahme eines konstanten c_w -Wertes - durch die geringere Anströmgeschwindigkeit reduziert. Die relative Veränderung durch die unterschiedlichen Anregungsformen gegenüber der Referenz ist nur geringfügig beeinflusst und wird die Reihenfolge der Widerstandsänderungen bei unterschiedlichen Anregungsformen nicht verändern. Es lässt sich also festhalten,

dass die Anströmgeschwindigkeit vermutlich einen beachtlichen Einfluss auf die Luftwiderstandskraft hat, aber der zeitliche Verlauf der Anregungsform weiterhin zu berücksichtigen ist.

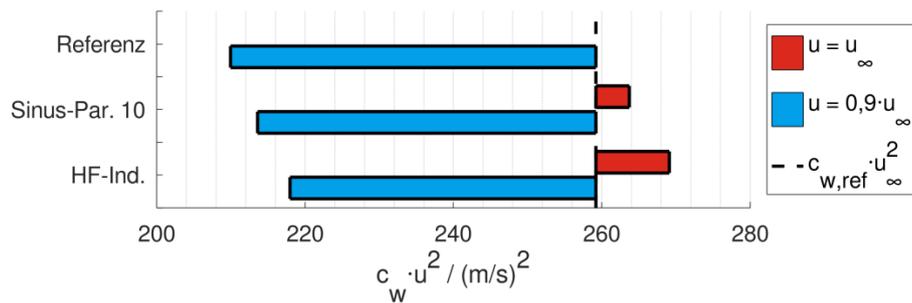


Abbildung 6-44: Um die Anströmgeschwindigkeit modifizierter Widerstandsbeiwert für die Anregungsformen der *Referenz* (oben), *Sinus-Par. 10* (mittig) und *HF-Ind.* (unten) für die Anströmgeschwindigkeit u_∞ (rot) und eine angenommene um 10 % reduzierten Anströmgeschwindigkeit (blau) gegenüber dem Referenzwert (gestrichelte Linie).

Neben den mittleren Beiwerten soll die Entwicklung der Widerstandsbeiwerte untersucht werden. Hierzu sind in Abbildung 6-45 die Verläufe für die Anregungsformen *HF-Ind.* (links), *Sin-Par. 10* (mittig) und den quasi-statischen Fall (rechts) über die Zeit dargestellt. In allen Fällen sind die periodischen Strukturen zu erkennen. Insbesondere für *Sin-Par. 10* zeigt sich die Periodizität, wenn auch nicht mehr so gleichmäßig über die Zeit wie beispielsweise in der Anströmung oder beim Druck an der Fahrzeugfront. Während die Signale im Windkanal in den Ausschnitten zwischen 0,25 und 0,35 schwanken, ist der Schwankungsbereich von *HF-Quasistatisch* deutlich kleiner, da durch diesen Ansatz nur Anstiege im Widerstandsbeiwert gegenüber $\beta = 0^\circ$ möglich sind. Darüber hinaus steigen die Werte auch weniger stark an als bei den experimentellen, instationären Methoden.

Die beschriebenen Schwankungen stimmen auch mit den zuvor bestimmten Standardabweichungen überein. *HF-Ind.* weist die stärksten Schwankungen und folglich die größte Standardabweichung auf, während die Standardabweichung bei *HF-Quasistatisch* am geringsten ist. Auch der Anstieg der Mittelwerte gegenüber dem Referenzwert von $c_w = 0,288$ ist in Abbildung 6-45 gut zu erkennen.

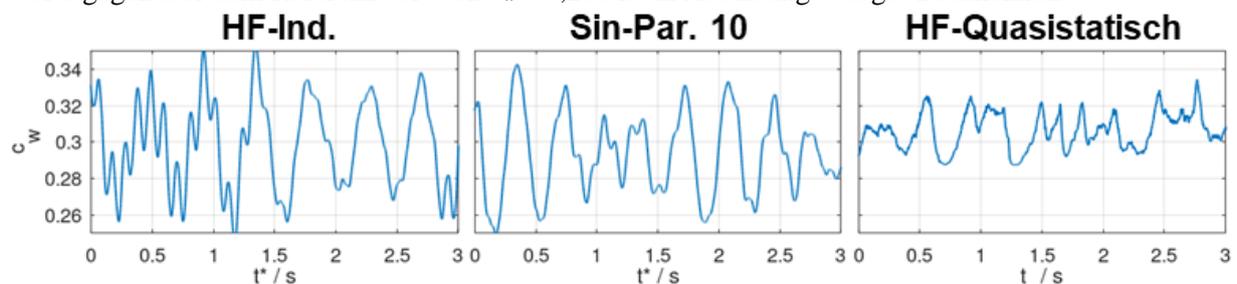


Abbildung 6-45: Auf 1:1-Maßstab angepasste Zeitabschnitte der instationären Verläufe der Widerstandsbeiwerte für die Hinterherfahrt für die Anregungsformen *HF-Ind.* (links), *Sin-Par. 10* (mittig) und für einen aus dem Signal der Hinterherfahrt auf der Teststrecke berechneten quasi-statischen Widerstandsbeiwert (rechts).

6.4.3 Fazit für die Hinterherfahrt

Die realen Strömungsbedingungen für die Hinterherfahrt auf der Teststrecke konnten im Windkanal mit dem aktiven Klappensystem und passiven Turbulenzgeneratoren erfolgreich simuliert werden. Es wurden sowohl die instationäre Anströmung als auch wesentliche Strömungsparameter, wie die Turbulenzintensität und das integrale turbulente Längenmaß, nachgebildet. Die Ergebnisse zeigen, dass die Form der Anströmbedingungen einen signifikanten Einfluss auf den statischen und dynamischen Widerstandsbeiwert hat.

Durch den Vergleich der bei der Hinterherfahrt am Versuchsfahrzeug und am 1:4-Windkanalmodell gemessenen Druckwerten bei unterschiedlichen Anregungsformen der Flaps des Klappensystems konnte eine direkte Validierung der Ergebnisse aus den Windkanalversuchen mit den Ergebnissen aus den Fahrversuchen unter realen Bedingungen auf der Teststrecke durchgeführt werden. Diese Validierung zeigt, dass die beste Übereinstimmung mit der Anregungsform *HF-Ind.* erreicht wird. Diese Anregungsform basiert auf den – im Verlauf eines Überholmanövers auf der Teststrecke an unterschiedlichen Stellen über der gesamten Fahrzeugbreite gemessenen – Zeitsignalen der Anströmwinkel am Array. Es konnten sowohl für den mittleren Druckbeiwert, den zeitlichen Verlauf der Druckschwankungen als auch für das Druckspektrum gute Übereinstimmungen mit den zur Validierung verwendeten Ergebnissen aus den Versuchen auf der Teststrecke erzielt werden. Die Bedeutung einer realitätsnahen Anregung wird insbesondere bei den Messungen der Widerstandsbeiwerte deutlich. Neben einem Anstieg des Widerstandsbeiwerts – hervorgerufen durch eine instationäre Anströmung – zeigen die Messungen, dass die Anregungsform eine wichtige Rolle für die Widerstandszunahme spielt. Die direkte Nachbildung der Anströmverhältnisse aus den Versuchen auf der Teststrecke (*HF-Ind.*) durch das Klappensystem zusammen mit dem kleinen passiven Turbulenzgenerator führt zu deutlich höheren Widerständen als bei für die Referenz mit freier Anströmung oder statistisch stationärer Anströmung (*Sin-Par.*). Da die direkte Nachbildung *HF-Ind.* über Druckbeiwerte mit den realen Messungen validiert werden konnte, ist davon auszugehen, dass dieser Ansatz die verlässlichsten Ergebnisse in Bezug auf die Widerstandsbeiwerte liefert und die Nachbildung statistischer Strömungsgrößen (Tu , L) nicht ausreichend ist. Im Hinblick auf die Widerstandsbeiwerte scheint jedoch zumindest eine Vereinfachung über das die gleiche Anregungsform mit parallel bewegten Flaps (*HF-Par.*) möglich. Zusätzlich empfiehlt es sich die Anströmgeschwindigkeit zu berücksichtigen, wenn die absolute Kraft bestimmt werden soll, da diese auf Grund der verringerten Anströmgeschwindigkeit gegenüber der Fahrgeschwindigkeit zu einer deutlichen Verschiebung der absoluten Kraftwerte für die gezeigten Hinterherfahrten führt.

6.5 Bestimmung der auf das 1:4-Modell wirkenden Kräfte beim Überholmanöver in der SWG

Genau wie bei der Hinterherfahrt auf der Teststrecke, waren auch bei den Überholmanövern keine direkten Kraftmessungen möglich. Für den Fall der Hinterherfahrt wurde gezeigt, dass die Form der Anströmung einen deutlichen Einfluss auf die Beiwerte haben kann. Vor diesem Hintergrund ist das Überholmanöver mit seinen - in Kapitel 5.3 erläuterten - 4 unterschiedlichen Phasen mit unterschiedlichen Strömungsbedingungen von besonderem Interesse. Auf Grund der Unterschiede in der Anströmung in den 4 Phasen, ist zu erwarten, dass sich diese unterschiedlichen Anströmbedingungen während des Überholmanövers auf die Druckverteilung am Fahrzeug und dessen Widerstandsbeiwert auswirken. Daher soll im Folgenden das Überholmanöver repräsentativ für eine instationäre Anströmung im Windkanal im Detail analysiert werden. Dabei ist die Betrachtung der mittleren Beiwerte im Gegensatz zur Hinterherfahrt nicht hilfreich, da sich die Anströmung während des instationären Überholmanövers – wie in Kapitel 5.3 gezeigt – nicht statistisch stationär verhält und die einzelnen Phasen zum Teil nur aus kurzzeitigen Einzelereignissen bestehen. Die Berechnung eines mittleren Wertes wäre also deutlich von der Wahl des betrachteten Bereiches abhängig und würde einige wesentliche Einzelereignisse gegebenenfalls unterdrücken. Des Weiteren wurde in Kapitel 5.3.3 gezeigt, dass es auch bei quasi-statischen Ansätzen zu deutlichen Abweichungen für die Turbulenzintensitäten kommen kann. Über die zeitlichen Veränderungen der Drücke während der 4 Phasen des Überholmanövers soll zunächst die Druckverteilung am Windkanalmodell durch Vergleich mit der am Versuchsfahrzeug gemessenen Druckverteilung validiert werden. Eine gute Übereinstimmung dieser Druckverläufe demonstriert die Belastbarkeit der

Ergebnisse und somit auch die Übertragbarkeit der im Windkanal gemessenen Kräfte auf die am Versuchsfahrzeug angreifenden Kräfte.

Auf Grund der instationären Anströmung wird – wie in Kapitel 6.3.3 beschrieben – der Anströmwinkel β für das Überholmanöver auf der Teststrecke direkt im Windkanal nachgebildet. Hierfür wird nur die Zeitskala für die Versuche in der SWG nach Gleichung (13) angepasst. Die Versuche für die Hinterherfahrten haben gezeigt, dass eine direkte Nachbildung der zeitlichen Veränderung des Anströmwinkels und dessen Verlauf in Querrichtung über die gesamte Fahrzeugbreite unterstützt durch die kleinen passiven Turbulenzgeneratoren zur der besten Übereinstimmung mit den im Fahrversuch ermittelten Ergebnisse führt.

6.5.1 Validierung der Anströmbedingungen in der SWG anhand der Druckverteilungen aus den Fahrversuchen

Da die Kräfte in den Fahrversuchen auf der Teststrecke nicht direkt gemessen werden konnten, müssen zunächst die Anströmbedingungen und die resultierende Druckverteilung am Fahrzeug validiert werden. Dieser Schritt ist wichtig, um die Vorgehensweise bei der Durchführung einer zuverlässigen Kraftmessung zu bestätigen. Wie zuvor bei der Hinterherfahrt, wurden die Oberflächendrücke nicht zeitgleich mit den Messungen am Array aufgezeichnet, sondern mit Hilfe von – ansonsten identischen – Fahrversuchen ohne das Array und dessen Einfluss auf das Versuchsfahrzeug ermittelt. Die Ergebnisse aus den Druckmessungen der Fahrversuche auf der Teststrecke passen also nicht direkt zu der im Windkanal angeregten Anströmung. Der Vergleich der Druckverläufe erlaubt aber dennoch qualitative und quantitative Rückschlüsse auf die Auswirkung in der Anströmung.

Abbildung 6-46 zeigt den Vergleich der instationären Schwankungen der an der Fahrzeugfront gemessenen Druckbeiwerte über der Zeit. Zur Ermittlung der Druckschwankungen wurden von den Drucksignalen an den jeweiligen Sonden der dort gültige Mittelwert subtrahiert, um Einflüsse der Fahrzeugform auf die dargestellten Druckverläufe zu minimieren. Bei den Ergebnissen aus den Fahrversuchen auf der Teststrecke wurden die mittleren Druckwerte der Konstantfahrten an der jeweiligen Position abgezogen. Für die Ergebnisse der Windkanalversuche wurden dagegen die mittleren Druckwerte aus den Messungen ohne Strömungsanregung verwendet. Im oberen Teil sind die Ergebnisse der Fahrversuche auf der Teststrecke, im unteren Teil die – zeitlich auf 1:1 skalierten (t^*) – Ergebnisse der Windkanalmessungen dargestellt.

Wie für die Anströmgeschwindigkeiten (Kapitel 5.3) können die 4 Phasen des Überholmanövers identifiziert werden. Dazu sind in Abbildung 6-46 die Übergänge zwischen den Phasen mit gestrichelten Linien gekennzeichnet. Die 1. Phase erstreckt sich bis $t \approx 5$ s. Sowohl bei Fahrversuchen als auch bei den Windkanalversuchen zeigen die Druckschwankungen unterschiedliche Vorzeichen an der linken und rechten Fahrzeugseite mit in der Zeit zufällig verteilten Vorzeichenwechsel. Die maximalen Amplituden der Fahrversuche werden in den Windkanalmessungen nicht ganz erreicht. Vermutlich liegt das an den Unterschieden zwischen der - für die Windkanalmessungen verwendeten - Versuchsfahrt mit Array und der zum Vergleich herangezogenen Versuchsfahrt für die Oberflächendrücke. Für diese beiden Signale konnte, wie zuvor erwähnt, technisch bedingt nicht dasselbe Signal verwendet werden.

In der 2. Phase des Überholmanövers nehmen die Druckschwankung im Verlauf der Zeit stabile Werte an, wobei die Werte auf der linken Seite höher sind als auf der rechten Seite. Dies gilt sowohl für die Windkanalmessung als auch für den Fahrversuch. Die dabei in Querrichtung auftretenden Druckunterschiede können – wenn auch mit definiertem, schmalerem Übergang - im Windkanal simuliert werden. Hier spielt vermutlich die begrenzte Anzahl an Flügeln in Querrichtung (siehe Abbildung 6-36) eine beschränkende Rolle.

In der 3. Phase stimmen die Verteilungen der im Fahrversuch und im Windkanal gemessenen Druckschwankung gut überein. Zu Beginn der 3. Phase ($7 \text{ s} < t^* < 8 \text{ s}$) weist der Druck in Querrichtung Unterschiede auf. Der niedrigere Druck herrscht dabei auf der rechten Fahrzeughälfte und erstreckt sich etwas über die Mitte bis auf die linke Fahrzeughälfte. Diese Verteilung kehrt sich bei etwa 8 s mit dem dort auftretenden Richtungswechsel des Anströmwinkels um. Allerdings findet der Übergang vom hohen zum niedrigen Druck nicht mehr im Bereich der Fahrzeugmitte statt. Der Bereich des höheren Druckes erstreckt sich schon von $\Delta y^* = -750 \text{ mm}$ bis $+1000 \text{ mm}$. Die leichte Veränderung der Druckverteilung aus dem Fahrversuch im Bereich um $t = 8,5 \text{ s}$ ist vermutlich auf einen natürlich auftretenden kurzen Seitenwind zurückzuführen, der in den Windkanalmessungen nicht vorhanden war. Die gute Übereinstimmung der Drücke zeigt, dass das zuvor erwähnte Druckfeld des Transporters keinen großen Einfluss auf das Fahrzeug hat. Die Nachbildung der Anströmung zeigt für die Anströmwinkel selbst in der 3. Phase (geringster Abstand zwischen den beiden Fahrzeugen) eine gute Übereinstimmung.

Bei $t = 9,6 \text{ s}$ beginnt die 4. Phase des Überholmanövers: Die freie Anströmung. Hier ist die durch die Anströmung bedingte Druckschwankung nur noch gering und liegt im Bereich von $c_p' = 0$.

Mit Hilfe des Klappensystems kann also eine Strömung erzeugt werden, die am Fahrzeugmodell eine Verteilung der Druckschwankungen erzeugt, die die wesentlichen Merkmale der Drücke (4 unterschiedliche Phasen, Amplituden, Schwankungsverhalten) der Fahrversuche widerspiegelt.

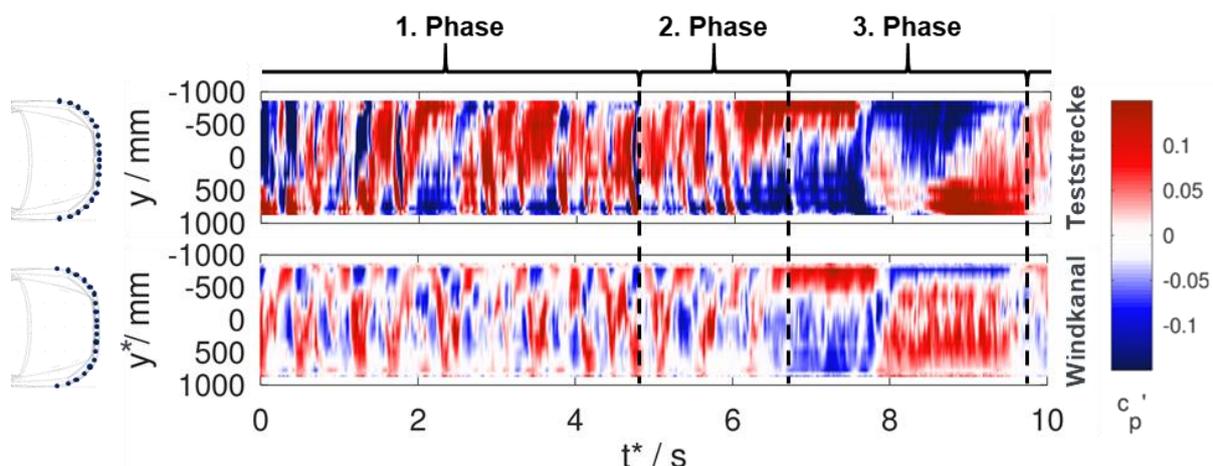


Abbildung 6-46: Zeitausschnitt vom Schwankungsfeld des Druckbeiwerts beim Überholmanöver auf der Teststrecke (oben) und beim nachgebildeten Signal im Windkanal (unten) an der vorderen Stoßstange. Die Grenzen der 4 Phasen des Überholmanövers werden durch die gestrichelten Linien markiert. Die Breite y^* und die Zeit t^* sind für die Windkanalmessungen auf 1:1 skaliert.

Abbildung 6-47 zeigt die Druckschwankungen für denselben Zeitabschnitt im Bereich der Fahrzeugfront (links) und des Fahrzeughecks (rechts) an ausgewählten Druckbohrungen. Die Ergebnisse der Fahrversuche auf der Teststrecke sind wieder oben und die der Windkanalversuch sind unten gezeigt. Die blauen Kurven zeigen die Druckschwankungen auf der linken, die gelben auf der rechten Seite. Die grünen Kurven repräsentieren die Schwankungen in der Fahrzeugmitte.

Wie zuvor beschrieben, unterscheiden sich die Amplituden der Druckschwankung nur unwesentlich. Dies ist auf die leicht unterschiedlichen Anströmungen bei den Versuchsfahrten zurückzuführen. Zusätzlich bilden sich in der 1. Phase der Fahrversuche einzelne Maxima (z.B. $c_p' = -0,23$ bei $t^* = 1,3 \text{ s}$), die in den Messergebnissen aus dem Windkanal nicht auftreten, da trotz der hohen Dynamik von bis zu 40 Hz die Flaps in der kurzen Zeit nicht schnell genug über solch große Winkel bewegt werden können. Auf Grund der Trägheit der Flügel werden diese einzelnen Extrema also vermutlich herausgefiltert. Von

diesen Einzelereignissen abgesehen ist aber ein ähnliches Verhalten in den Schwankungen der 1. Phase erkennbar. Die 2. Phase ($5 \text{ s} < t^* < 6,5 \text{ s}$) ist in beiden Versuchen von einem Abklingen der überlagernden kleinskaligen Schwankungen und einem unterschiedlichen Druckverlauf zwischen linker und rechter Seite an den Druckbohrungen gekennzeichnet. Gegenüber dem Mittel der Konstantfahrt ist der Druck auf der linken Fahrzeugseite erhöht und nimmt zur rechten Seite hin ab. In der 3. Phase (bis $t = 9,6 \text{ s}$) zeigt sich wieder die großskalige Druckschwankung, die zu einer Umkehrung der Druckverteilung zwischen der linken und rechten Fahrzeugseite führt. Das Minimum auf der linken Fahrzeugseite – das bei der Versuchsfahrt auf der Teststrecke auftritt – entspricht dem im vorhergehenden Abschnitt (Abbildung 6-46) genannten Einzelereignis, das vermutlich durch eine Böe ausgelöst wurde. In der 4. Phase gehen die Schwankungen im Druckbeiwert wieder auf null zurück – die Druckverteilung entspricht also nahezu der Konstantfahrt.

Am Heck sind kaum Einflüsse der Anströmung auf die Druckentwicklung erkennbar. Es tritt ein kontinuierliches Rauschen – vermutlich bedingt durch die Ablösung am Heck – auf. Dieses ist in den Fahrversuchen etwas stärker als im Windkanal. Lediglich die 3. Phase des Überholmanövers mit den deutlichen, großskaligen Änderungen im Anströmwinkel wirkt sich auch im Heckbereich aus. In den Windkanalmessungen ist dieser Effekt allerdings – insbesondere auf der windabgewandten Seite – kleiner, was auf Effekte durch die Skalierung des Nachlaufs zurückzuführen sein könnte. Eine Erklärung dafür, dass nur die großskaligen Strömungsbewegungen der Anströmung einen Einfluss auf die Druckverteilung am Heck haben, könnte der stabile Nachlauf sein, der träge auf die Änderungen der Strömung reagiert. Kurzzeitige Änderungen in der Anströmung würden also auf Grund der Trägheit gedämpft.

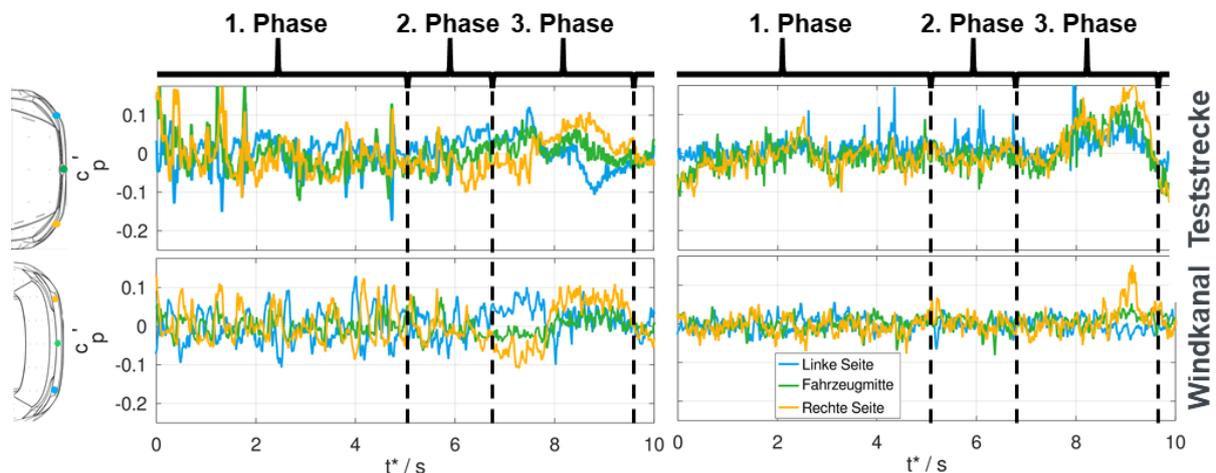


Abbildung 6-47: Zeitausschnitte der Druckschwankungen an der vorderen (links) und hinteren (rechts) Stoßstange während des Überholmanövers auf der Teststrecke (oben) und beim nachgebildeten Signal im Windkanal (unten). Farbgebung der Druckbohrungen: blau: links; grün: mittig; gelb: rechts. Gestrichelte Linien: Abgrenzung der Phasen des Überholmanövers.

Die am Modellfahrzeug beim Überholmanöver in der SWG gemessenen Druckschwankungen, konnten mit den Ergebnissen Fahrversuchen validiert werden. Insgesamt konnten die 4 Phasen des Überholmanövers und deren Eigenschaften gut nachgebildet werden.

6.5.2 Instationäre Kraftbeiwerte während des Überholmanövers

Die Validierung der Druckbeiwerte der Windkanalversuche mit denen der Versuchsfahrten auf dem Testgelände ist äußerst wichtig. Durch die Validierung wird die Annahme, dass die im Windkanal ermittelten Kraftbeiwerte verlässliche Größen sind, bekräftigt, da eine direkte Kraftmessung während der

Fahrten auf dem Testgelände nicht möglich war. Mit dem Wissen, dass die Drücke akkurat simuliert werden, kann man jetzt die im Windkanal ermittelten instationären Kraftbeiwerte analysiert werden. Dabei werden die Auswirkungen der unterschiedlichen Phasen auf die Kräfte betrachtet.

Um das überlagerte Messrauschen in den Kraftmessungen zu reduzieren, wurden durch einen Butterworth-Tiefpassfilter die nicht relevanten Frequenzen von über 30 Hz herausgefiltert. Abbildung 6-48 zeigt die Veränderung des Widerstandsbeiwerts (blau) gegenüber der statischen Referenz als $\Delta c_w = c_w(t) - c_{w,Ref}$ und die Veränderung des Seitenkraftbeiwerts gegenüber der Referenz $\Delta c_s = c_s(t) - c_{s,Ref}$ über die Zeit. Die den c_w -Werten zugehörige y-Achse befindet sich links, die den c_s -Werten zugehörige y-Achse rechts.

Die Beiwerte weisen dabei zeitliche Verläufe auf, in denen sich die unterschiedlichen Phasen des Überholmanövers widerspiegeln. In der 1. Phase ($0 \text{ s} < t < 5 \text{ s}$) liegt Δc_w im Durchschnitt bei $\Delta c_w \approx 0$, wobei die Schwankungen in diesem Zeitraum von $\pm 0,002$ auf $\pm 0,004$ ansteigen. Die Zunahme der Schwankung stimmt mit der in Abbildung 6-36 gezeigten Erhöhung der Turbulenzintensität in diesem Bereich überein. Die Schwankung der Seitenkraft ist deutlich größer und liegt in diesem Zeitabschnitt in einem Bereich von circa $\pm 0,02$. Das Mittel ist nicht bei $\Delta c_s = 0$, sondern zeigt eine leichte Asymmetrie von $\Delta c_s \approx 0,01$. Diese Abweichung ist vermutlich eine Folge der versetzten Fahrt auf der 2. Fahrspur hinter dem Transporter und einer daraus resultierenden, leicht asymmetrischen Anströmung zwischen der linken und rechten Fahrzeugseite.

Der Bereich der 2. Phase ($5 \text{ s} < t < 7 \text{ s}$) zeigt eine kurzfristige Verringerung des Widerstandsbeiwerts um 0,005, gefolgt von einem Übergang in die großskaligen Effekte der nächsten Phase. Der Seitenkraftbeiwert ändert sich nur unwesentlich in dieser Phase. Die die Phase 1 prägenden Schwingungen klingen während der 2. Phase jedoch sowohl für den Seiten- als auch den Widerstandsbeiwert ab.

In Phase 3 ($7 \text{ s} < t < 9 \text{ s}$) zeigen beide Beiwerte, analog zur Anströmung und dem Druck an der Fahrzeugfront, primär großskalige Effekte, die zu deutlichen Schwankungen führen. So erhöht sich der Widerstandsbeiwert in der ersten Hälfte von Phase 2 nur leicht gegenüber der Referenz, fällt jedoch dann kurzfristig deutlich um 0,011, um danach wieder auf 0 anzusteigen. Beim Seitenkraftbeiwert ist dieser Trend gegenläufig und deutlicher ausgeprägt. In der ersten Hälfte der 3. Phase fällt der Seitenkraftbeiwert auf -0,08. Dieser Abfall wird durch die Anströmung von links ($\beta > 0^\circ$, siehe z.B. Abbildung 5-22, Abbildung 5-23 und Abbildung 5-26) verursacht. Umgekehrt kommt es für die Anströmung aus der Gegenrichtung zu einem deutlichen Anstieg des Seitenkraftbeiwerts auf +0,08. Innerhalb kurzer Zeit findet also auf Grund der Anströmung in Phase 3 eine signifikante Änderung der Seitenkraft – inklusive Richtungswechsel – statt.

In der letzten Phase wird wieder der Einfluss der beruhigten, freien Anströmung deutlich – die Schwankungen sinken auf ein Minimum und sowohl Δc_w als auch Δc_s gehen auf nahezu 0 bei niedrigen Schwankungen zurück.

Die Kraftmessungen bestätigen, dass der Versuchsaufbau geeignet ist, um instationäre Einflüsse zu erfassen. Die in Kapitel 5.3 gezeigten Phasen und deren Eigenschaften in der Anströmung des Überholmanövers auf der Teststrecke können sinnvoll mit dem zugehörigen zeitlichen Verlauf der Kraftbeiwerte in den Windkanalmessungen in Verbindung gebracht werden.

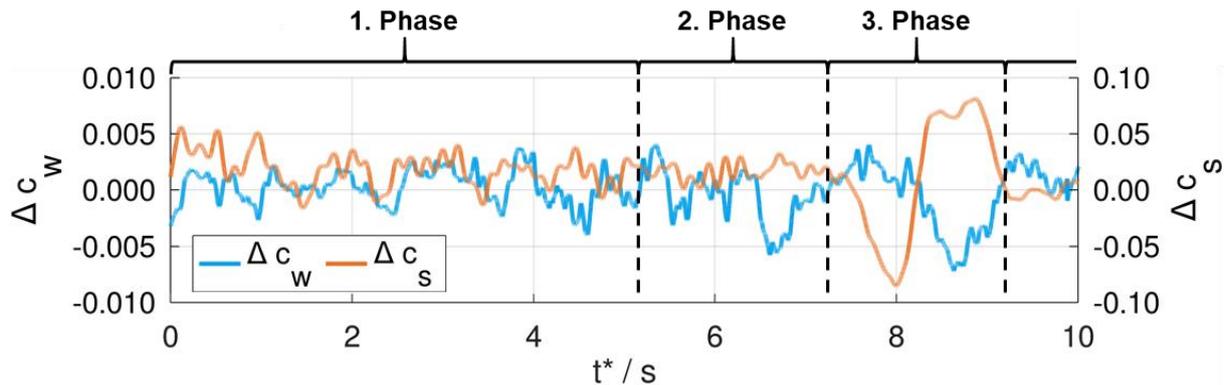


Abbildung 6-48: Zeitlicher Verlauf der Widerstandsbeiwerte (blau, linke Achse) und der Seitenkraftbeiwerte (orange, rechte Achse) am 1:4-Modell im Windkanal für eine individuelle Klappenanregung über die Breite mit dem Signal aus dem Überholmanöver von der Teststrecke mit den 4 Phasen (Abtrennung der Phasen durch gestrichelte Linien).

6.5.3 Fazit für das Überholmanöver

Die Validierung der Druckverteilung am 1:4-Fahrzeugmodell im Windkanal mit der Druckverteilung am Fahrzeug auf der Teststrecke zeigt, dass die instationären Anströmbedingungen (siehe auch Kapitel 5.3 und 6.5.1) für das Überholmanöver mit dem Klappensystem in der SWG realistisch simuliert und am Modellfahrzeug im Windkanal im Prinzip zu denselben Effekten führen. So werden die Auswirkungen der 4 Phasen des Überholmanövers auf die Drücke realistisch dargestellt. Die Schwankungen zeigen in den unterschiedlichen Phasen ähnliche Größenordnungen für die Amplituden und die Verläufe stimmen gut überein. Lediglich kleinskalige Effekte können auf Grund des Auflösungsvermögens des Klappensystems nicht in vollem Umfang nachgebildet werden.

Die aus der validierten instationären Druckverteilung resultierenden Kraftbeiwerte in den Windkanalmessungen erfassen die wesentlichen instationären Einflüsse des Überholmanövers. So sind Auswirkungen auf das Fahrzeug der in Kapitel 5.3 und 6.3.3 gezeigten typischen 4 Phasen des Überholmanövers erkennbar. Dazu gehören die zunehmenden kleinskaligen Schwankungen der Kräfte in der 1. Phase, sowie deren Abklingen und ein Übergang in die großskaligen Effekte in der 2. und 3. Phase.

Der Aufbau mit einem aktiven Klappensystem im geschlossenen Windkanal der SWG zusammen mit dem kleinen passiven Turbulenzgenerator konnte also mit den Messungen auf der Teststrecke validiert werden und ist geeignet, um die instationären Kraft- und Druckbeiwerte des Überholmanövers im Modellmaßstab zu untersuchen.

6.6 Nachbildung des impulsartigen Seitenwinds in der TSG

Mit Hilfe der Windkanalexperimente wurde der Einfluss von sich kontinuierlich verändernden Anströmbedingungen auf das Fahrzeug untersucht. In diesem Kapitel wird insbesondere der Einfluss einer Böe – in Form eines impulsartigen Seitenwinds – beschrieben. Um die Auswirkung des instationären Seitenwinds auf eine realistische Fahrzeuggeometrie zu untersuchen, wurden skalierte Versuche mit einem bewegten Fahrzeugmodell und einem plötzlich auftretenden Seitenwind in der TSG durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen ist es, die Ergebnisse aus den Fahrversuchen an der BMW Seitenwindanlage in Aschheim zu bestätigen und die Erkenntnisse mit Hilfe des Modellversuches noch zu vertiefen. Die Ergebnisse aus den Versuchen sollen dazu beitragen, die komplexen, kontinuierlichen Änderungen in der Anströmung (die als eine Kombination vieler Impulse betrachtet werden kann) besser zu verstehen.

Im Gegensatz zu den Versuchen auf der Teststrecke werden die Modellversuche unter Laborbedingungen durchgeführt. Das erlaubt eine bessere Definition und Kontrolle der Versuchsgrößen (z.B. keine Einflüsse durch atmosphärischen Wind, keine Temperaturschwankungen) und führt somit zu einer besseren Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. Außerdem können mit dem Versuchsaufbau deutlich größere Anströmwinkel als in den Windkanaluntersuchungen realisiert werden. Somit können auch die Ergebnisse für große Anströmwinkel validiert werden. Die großen Anströmwinkel repräsentieren extreme Seitenwindbedingungen, die in der Realität auftreten können. Das Ziel der vorliegenden Studie ist es zu zeigen, dass ein bewegtes Versuchsmodell in Kombination mit einem Seitenwindmodul dazu geeignet ist, instationäre Anströmbedingungen experimentell zu untersuchen.

Der Druckbeiwert wird mit folgender Formel berechnet:

$$c_p = (p_i - p_\infty) / (0,5 \cdot \rho \cdot v_F^2) \quad \text{Gleichung (19)}$$

wobei die Geschwindigkeit des Modells über dem Boden, v_F , im Nenner verwendet wird, um den dynamischen Druck zu bestimmen. Diese Methode wird sowohl für den Versuchsaufbau mit dem beweglichen Modell als auch für die Versuche mit dem Originalfahrzeug angewandt. Das führt jedoch dazu, dass c_p -Werte größer als 1 möglich sind, wenn das Fahrzeug in den Seitenwindbereich einfährt, wo zur Erzeugung des Anstellwinkels eine zusätzliche Geschwindigkeitskomponente v_w addiert wird. Allerdings ist diese Vereinfachung nötig, um die kontinuierliche Änderung im Scherbereich, wo die Strömungssituation über das Fahrzeug nicht gleichmäßig ist, eindeutig beschreiben zu können. Mit den folgenden Ergebnissen wird die instationäre Druckänderung in Bezug auf die stationäre Druckverteilung ausgewertet. Dieser mittlere Referenzdruck (aus ~400 Versuchsfahrten) wird aus den statischen Drücken vor der Einfahrt in den Seitenwindbereich der Anlage als Durchschnitt berechnet:

$$c'_p = c_p - \bar{c}_{p,\beta=0^\circ} \quad \text{Gleichung (20)}$$

Der Eindeutigkeit halber werden die instationären Ergebnisse mit einem 1000-Hz Butterworth-Tiefpass gefiltert.

6.6.1 Einzelfahrten

Abbildung 6-49 zeigt beispielhaft die Daten für die Druckkoeffizienten, die Beschleunigung und die Lichtschranken, –dargestellt über der Zeit – die von den auf dem Modell mitgeführten Sensoren gemessen wurden. Die Beschleunigung des Modells während der Startphase, gefolgt von der Verlangsamung über die Gesamtlänge der Teststrecke sowie einige Vibrationen nach dem Verlassen des Seitenwindbereichs sind in den Daten des Beschleunigungssensors zu erkennen (Abbildung 6-49b). Mit dem Fototransistor wurden auch die in den Boden unter dem Modell eingebetteten LEDs eindeutig registriert (Abbildung 6-49c). Diese Ergebnisse für die auftretenden Beschleunigungen und die Lichtschrankensignale zeigen, dass die neuentwickelte TSG-Fahrzeugmodellkonfiguration sowie das mitgeführte Datenerfassungssystem auch unter anspruchsvollen Versuchsbedingungen gut funktionieren. Dieser Versuchsaufbau kann zur Untersuchung von instationärem Seitenwind, wie hier dargestellt, aber zum Beispiel auch zur Untersuchung der instationären Interaktion mit der Infrastruktur genutzt werden.

Abbildung 6-49a zeigt den instationären Druck für die 24 Druckbohrungen (Farblegende der einzelnen Bohrungen, siehe Abbildung 6-49). Die Beschleunigung, Verlangsamung und der Einfluss der Bodenplatte sowie natürlich des Seitenwinds sind deutlich an den Druckänderungen zu erkennen. So steigt beispielweise der c_p -Wert an den Messstellen der Fahrzeugfront mit der Beschleunigung des Fahrzeugs an. Die Einfahrt in den Rampenbereich ist an der linken gestrichelten schwarzen Linie in Abbildung 6-49d in Form eines Druckabfalls an der Front zu erkennen. Abbildung 6-49d zeigt außerdem eine detailliertere Darstellung des Bereichs um das Seitenwindmodul. Die räumlichen Positionen der Kompo-

nennten der Versuchsanlage sowie das Fenster für den Bereich zur Berechnung des Mittelwerts im Seitenwind sind hier dargestellt. Im Bereich des Seitenwindes erfolgen deutliche Änderungen des Drucks. Die Reaktionen in der Druckverteilung am Fahrzeug lassen sich also den äußeren Einflüssen zuordnen. Dies zeigt, dass der Versuchsaufbau geeignet ist, den Einfluss der Umgebung und die Strömung, der das Fahrzeug ausgesetzt ist, zu untersuchen.

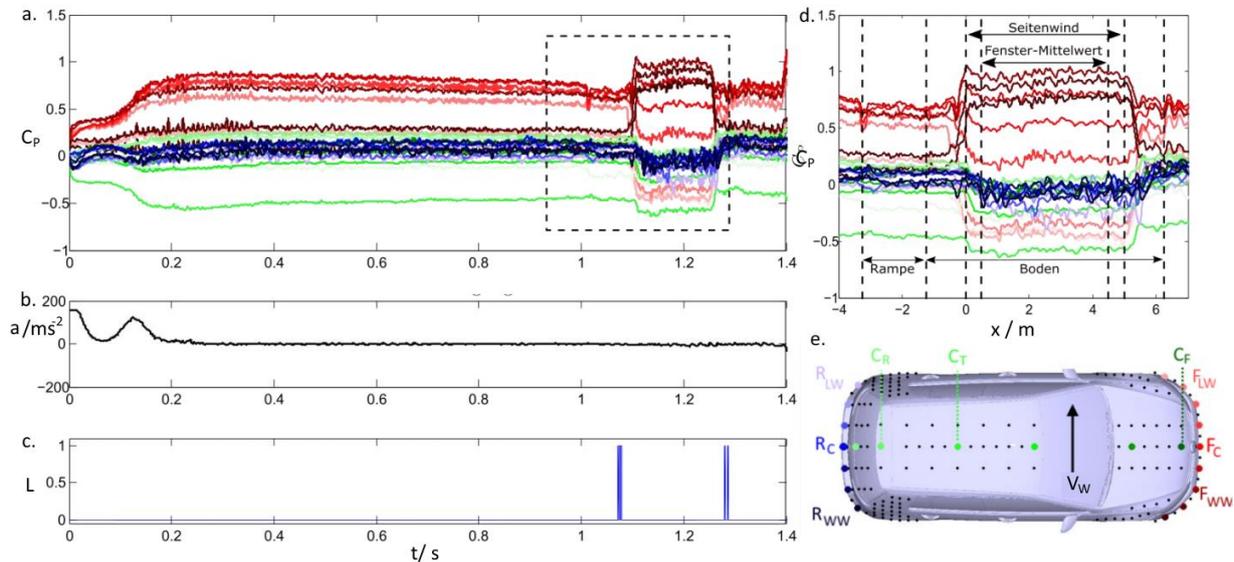


Abbildung 6-49: Beispieldaten einer einzelnen Modellfahrt ($v_F = 35$ m/s, $\beta = 0^\circ$), a) instationärer Druck an den 24 Positionen der Druckbohrungen, b) Beschleunigungsmesser, c) Fototransistor, d) instationärer Druck im Seitenwindbereich. e) Bezeichnung der Druckbohrungen.

6.6.2 Zeitlich gemittelter Druck

Die Auswirkung unterschiedlicher effektiver Anstellwinkel auf den durchschnittlichen Druck innerhalb des Seitenwindabschnitts ist in Abbildung 6-50 für die vordere Stoßstange, die Mittellinie und die hintere Stoßstange dargestellt. Die unterschiedlichen Anstellwinkel sind als Druckänderung in Relation zum Anstellwinkel $\beta = 0^\circ$ wiedergegeben. Der gravierendste Unterschied zeigt sich an der vorderen Stoßstange durch einen erhöhten Druck auf der Luvseite (+y) und einen verringerten Druck auf der Leeseite (-y), wobei die Abweichungen mit größeren Anstellwinkeln zunehmen. In Bezug auf die Mittellinie und die hintere Stoßstange entsprechen größere Anstellwinkel einem allgemeinen Druckabfall.

6.6.3 Instationärer Druck

Abbildung 6-52 zeigt den instationären Druck am Fahrzeug für ausgewählte Bohrungen für den Verlauf der gefahrenen Strecke. (Die Positionen der Bohrungen sind Abbildung 6-49 zu entnehmen.) Ähnlich wie bei den zeitlich gemittelten Ergebnissen tritt die größte Druckänderung beim Einfahren in den Seitenwind ($x = 0$ m - 5 m) an der vorderen Stoßstange auf. Insbesondere führt dies zu einem deutlich reduzierten Druck auf der Leeseite, erhöhtem Druck auf der Luvseite und verringertem Druck über dem Dach und an der hinteren Stoßstange. Die Größenordnung dieser Veränderungen nimmt mit zunehmendem Anstellwinkel (β) zu. Die initialen Änderungen im Druckverlauf – verursacht durch den auftretenden Seitenwind – treten nach unterschiedlichen Distanzen x , für die betrachteten Druckmessstellen (Abbildung 6-52a-e) auf. Die zurückgelegte Distanz des Versuchsfahrzeugs bis sich stationärer Druck einstellt, hängt dabei von der Lage der Druckbohrung ab. Der Versatz in x-Richtung der jeweiligen Bohrung entspricht allerdings nicht unbedingt der zusätzlich zurückgelegten Wegstrecke des Fahrzeugmodells – es treten also je nach Position unterschiedliche instationäre Effekte im Druckverlauf auf. Zusätzlich unterscheiden sich je nach Lage der Messstellen auch die Amplituden des Drucks im Seitenwindbereich.

Die instationären Eigenschaften sind in Abbildung 6-51 für den Fall $\beta = 30^\circ$ genauer dargestellt. Dort sind alle 24 Druckverläufe von der vorderen Stoßstange, vom Dach und von der hinteren Stoßstange abgebildet (für Farblegende siehe Abbildung 6-49). Für die vordere Stoßstange ist ein deutlicher Unterschied zwischen der Luvseite (dunklere rote Linien) und der Leeseite (hellere rote Linien) hinsichtlich der Zeit zu erkennen, die der instationäre Druck benötigt, um einen einigermaßen stabilen Zustand zu erreichen. In der Regel ist der Druck nach einem Anstieg auf der Luvseite von $c_p \sim +0,7$ bei $x \sim 0,25$ m stabil. Allerdings dauert es bis $x \sim 1$ m (2,5 Fahrzeuglängen) bis sich der Druckabfall auf einem Wert von $c_p \sim 1,2$ einpendelt. Dies ist vermutlich auf die Zeitspanne zurückzuführen, die die komplexe 3D-Ablösung und die Wirbel, die für den niedrigen Druck auf der Leeseite verantwortlich sind, für ihre Entstehung benötigen, sobald das Fahrzeug dem Seitenwind ausgesetzt ist. Im Gegensatz dazu pendeln sich sowohl der luvseitige als auch der leeseitige Druck auf ähnliche Weise wieder auf ihrem Ursprungsniveau ein, sobald das Fahrzeug nicht mehr dem Seitenwind ausgesetzt ist. Diese Eigenschaften lassen sich leichter in der Ableitung der instationären Drucksignale erkennen, die in Abbildung 6-53 dargestellt sind. Dort zeigen sich deutliche Unterschiede in der Änderungsrate des Drucks zwischen der Luv- und Leeseite bei $x = 0$ m, wohingegen bei $x = 5$ m die Änderungsrate auf beiden Seiten relativ symmetrisch ist.

Auch die zeitliche Verschiebung, mit der der Seitenwindeinfluss an den verschiedenen Stellen des Fahrzeugs sichtbar wird, ist in diesen Ergebnissen deutlich erkennbar (Abbildung 6-51). Der Druck an der vorderen Stoßstange stabilisiert sich nach $x = 1$ m. Beim Dach und bei der hinteren Stoßstange hingegen stellt sich eine Stabilisierung des Drucks erst bei $x = 2 - 3$ m ein. In diesen Bereichen treten außerdem großskalige Schwankungen auf, die vermutlich auf die großskalige Ablösung der Strömung zurückzuführen sind. Interessanterweise dauert es in diesen Bereichen auch länger, bis sich die Werte wieder stabilisieren, nachdem der Bereich des auftretenden Seitenwinds verlassen wurde. Anstatt $\sim 0,4$ m hinter den vorderen Druckbohrungen, erreichen sie ihre Ursprungswerte erst wieder ~ 2 m nachdem der Seitenwindabschnitt verlassen wurde. Dies könnte auf die unterschiedliche Beschaffenheit des Strömungsfeldes an der Front um am Heck zurückzuführen sein. Während am Heck eine großskalige, hochturbulente Strömungablösung erfolgt, sind an der Fahrzeugfront eine beschleunigte Strömung und semi-kohärente Wirbel zu erwarten.

In mehreren Forschungsarbeiten [44–49] wurden ähnliche instationäre Eigenschaften für den Druck an Fahrzeuggeometrien identifiziert. Bei den untersuchten Geometrien handelte es sich jedoch um vereinfachte Fahrzeuggeometrien (z.B. Ahmed-, Windsor- oder SAE-Body) in kleinerem Maßstab und bei kleineren Reynolds-Zahlen. Nichtsdestoweniger wurden in allen Arbeiten instationäre Vorgänge festgestellt, die nicht mit Hilfe einer quasi-statischen Betrachtung erfasst werden konnten. Dies erhöht die Belastbarkeit der Ergebnisse der präsentierten Untersuchungen, die zusätzlich den Vorteil einer realistischen Fahrzeuggeometrie und moderner Messtechnik bieten.

6.6.4 Wiederholbarkeit und Sensitivität der Reynolds-Zahl

Abbildung 6-54a zeigt die Ergebnisse für den instationären Druck für dieselbe Bohrung an der Leeseite aus 4 unterschiedlichen Messungen unter denselben Bedingungen ($\beta = 30^\circ$, $v_F = 35$ m/s). Die leeseitige Bohrung wurde ausgewählt, da hier die Seitenwindempfindlichkeit besonders ausgeprägt ist, sowohl in der Druckschwankung als auch in der Dauer. Für die 4 Fahrten lassen sich nur minimale Unterschiede ($\Delta c_p = 0,1$) in Bezug auf den auftretenden Seitenwind feststellen. Die Schwankungen während sich das Modell im Seitenwind befindet ($x = 0 - 5$ m) und nachdem der Bereich des auftretenden Seitenwinds verlassen wurde ($x = 5 - 7$ m) unterscheiden sich leicht. Dies lässt sich jedoch darauf zurückführen, dass die instationäre Strömung um das Fahrzeugmodell (Wirbelablösung oder großskalige Schwingungen) sich bei den 4 Fahrten nicht in exakt derselben Phase befindet. Die Wiederholbarkeit sieht also vielversprechend aus und daher ist die vorliegende Analyse gerechtfertigt.

Um den Einfluss der Modellgeschwindigkeit sowie eine potentielle Empfindlichkeit gegenüber der Reynolds-Zahl zu untersuchen, wurde die Modellgeschwindigkeit ($v_F = 35; 42; 48$ m/s) mit der Seitenwindgeschwindigkeit ($v_w = 5,5; 7,1; 8$ m/s) variiert, um den relativen Anstellwinkel konstant bei $\beta = 10^\circ$ zu halten. Der instationäre Druck auf der leeseitigen Bohrung der vorderen Stoßstange ist in Abbildung 6-54 dargestellt, da die Empfindlichkeit hier am deutlichsten sichtbar wird. Die Ergebnisse sind weitgehend ähnlich, mit dem gleichen qualitativen Profil und ähnlichen Größenordnungen. Der Hauptunterschied liegt darin, dass bei höheren Geschwindigkeiten minimal weniger kleinskalige Schwankungen auftreten. Dies ist vermutlich auf einen Reynolds-Zahleffekt mit leicht variierenden instationären Strömungseigenschaften zurückzuführen. Möglicherweise gibt es entweder Variationen in der mechanischen Schwingung des Systems bei unterschiedlichen Betriebsgeschwindigkeiten oder die Auswirkungen der gleichbleibenden Schwingung auf die Drucksensoren (die unterschiedlichen Druckstärken ausgesetzt sind) sind unterschiedlich.

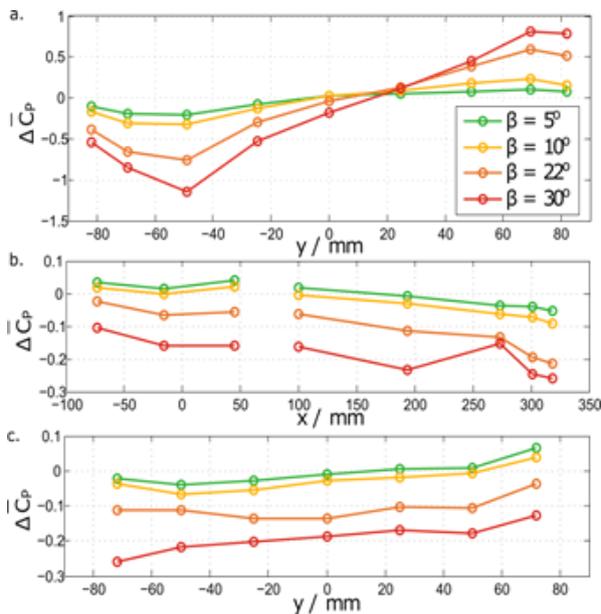


Abbildung 6-50: Änderung des zeitlich gemittelten Drucks von $\beta = 0^\circ$ auf unterschiedliche Anstellwinkel für a) vordere Stoßstange, b) Dach und c) hintere Stoßstange.

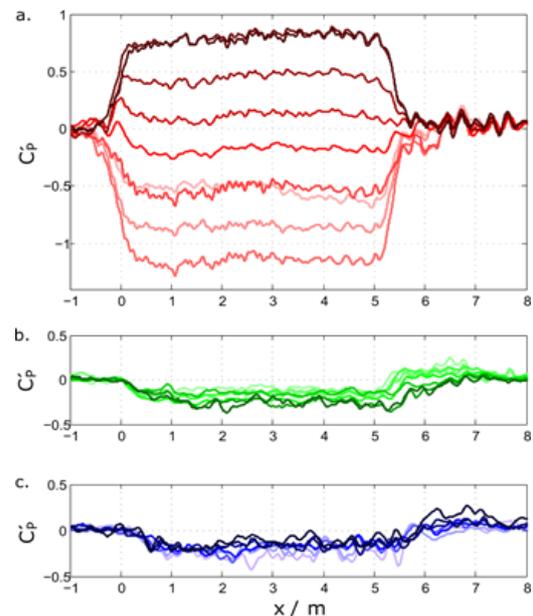


Abbildung 6-51: Instationärer Druck für $v_F = 35$ m/s, $\beta = 30^\circ$ an unterschiedlichen Druckpositionen: a) vordere Stoßstange (dunkel – hell = luvseitig - leeseitig). b) Mittellinie (dunkel - hell = Front - Heck). c) hintere Stoßstange (dunkel – hell = luvseitig - leeseitig) $v_F = 35$ m/s, $\beta = 30^\circ$.

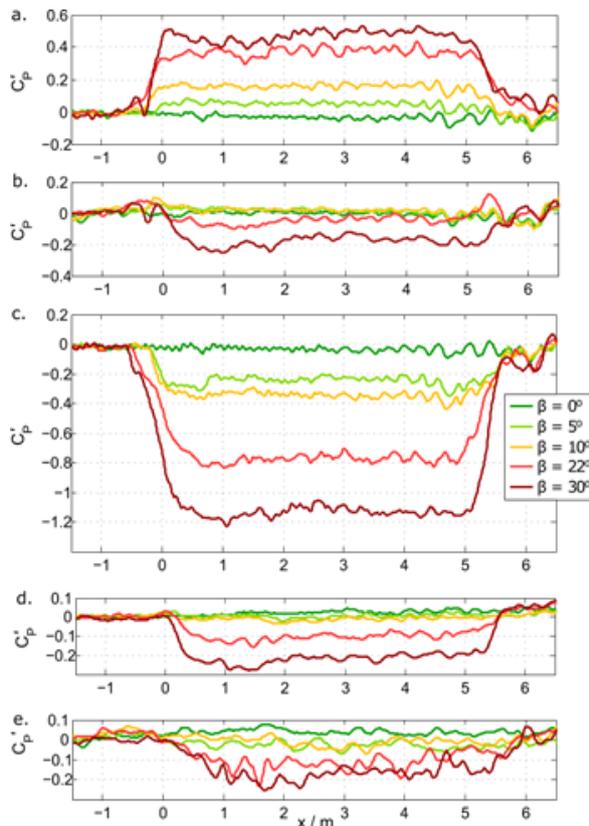


Abbildung 6-52: Instationärer Oberflächendruck während des auftretenden Seitenwinds ($x = 0 \text{ m} - -5 \text{ m}$) für unterschiedliche relative Anstellwinkel an ausgewählten Positionen: a) Luvseite der vorderen Stoßstange FWW, b) Mitte der vorderen Stoßstange FC, c) Leeseite der vorderen Stoßstange FLW, d) Dach CT, und e) Mitte der hinteren Stoßstange RC.

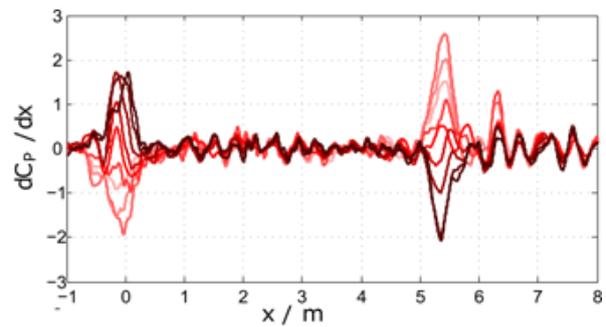


Abbildung 6-53: Ableitung des instationären Drucks für die vordere Stoßstange für $v_F = 35 \text{ m/s}$, $\beta = 30^\circ$.

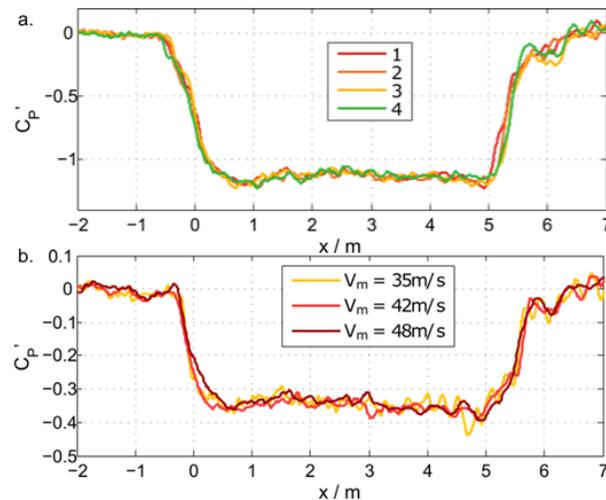


Abbildung 6-54: Instationärer Druck auf der Leeseite der vorderen Stoßstange, F_{LW} , für 4 unterschiedliche Fahrten mit dem bewegten Modell, a) alle bei $v_F = 35 \text{ m/s}$, $\beta = 30^\circ$ und b) bei $v_F = 35; 42; 48 \text{ m/s}$, alle bei $\beta = 10^\circ$.

6.6.5 Vergleich mit den Fahrversuchen am BMW-Seitenwindmodul

Im folgenden Abschnitt werden die instationären Druckmessungen, die in dem Experiment mit dem beweglichen Fahrzeugmodell im Maßstab 1:10 am DLR Göttingen durchgeführt wurden, direkt mit den Ergebnissen aus den Fahrversuchen bei BMW in Aschheim verglichen. Die Ergebnisse sind über derselben räumlichen x -Achse aufgetragen. Die Ergebnisse der Versuche mit dem bewegten Modell wurden so skaliert, dass sie dem Vollmaßstab entsprechen und sind in den Abbildungen mit m^* gekennzeichnet. Hier steht die erste Reaktion auf den Seitenwind im Mittelpunkt, da dieser Bereich die interessantesten Eigenschaften aufweist. Der an dieser Stelle durchgeführte Vergleich dient als Test für die Belastbarkeit der Ergebnisse, die bei den Experimenten mit dem bewegten Modell erzielt werden können. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass es Unterschiede zwischen den Anlagen gibt, insbesondere in Bezug auf die Art des Seitenwinds (Einheitlichkeit der Strömung, Turbulenz), der über den relativen Anstellwinkel hinaus erzeugt wird, und das Ausmaß der Scherschicht im Verhältnis zur Fahrzeuggröße.

Ausgewählte Bohrungen an der vorderen Stoßstange, auf dem Dach und an der hinteren Stoßstange sind in den Abbildung 6-55a - c dargestellt. Was den instationären Druck betrifft, so sind die Tendenzen in

den beiden Experimenten größtenteils konsistent. Der Anstieg an der Leeseite der Stoßstange, der Druckabfall auf der Luvseite sowie der geringe Rückgang am Dach und an der hinteren Stoßstange sind gut zu erkennen. Der Zeitunterschied zwischen leeseitiger und luvseitiger Stoßstange vor der Stabilisierung ist ebenso offensichtlich, tritt jedoch über eine kürzere Distanz für die volle Strömung auf. Die verzögerte Reaktion am Dach und an der hinteren Stoßstange ist ähnlich, ebenso wie das Auftreten großer Schwankungen. Jedoch ist die Stärke der Schwankungen bei den Fahrversuchen mit dem Originalfahrzeug größer, insbesondere an der hinteren Stoßstange. Diese Unterschiede in den Schwankungen könnten an den Auswirkungen der Reynolds-Zahl liegen.

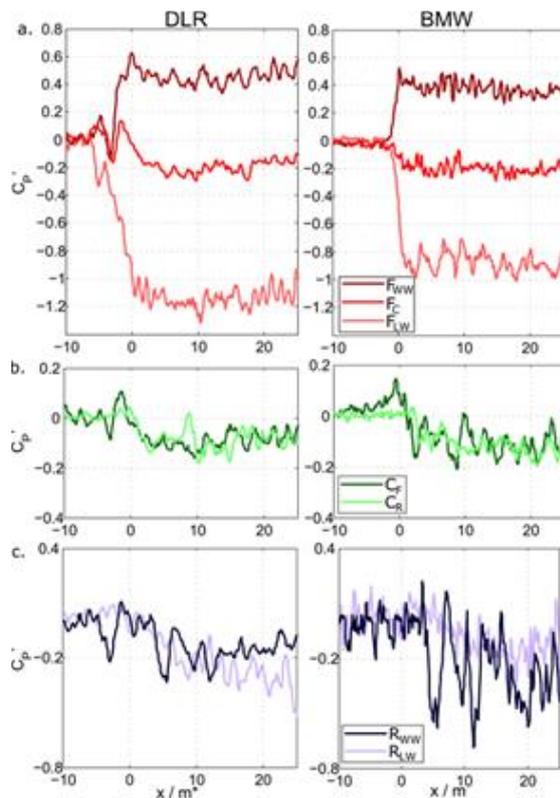


Abbildung 6-55: Instationärer Druck für die Modellversuche und die Versuche mit dem Originalfahrzeug: a) vordere Stoßstange, b) Mittellinie, c) hintere Stoßstange (Positionen, siehe Abbildung 5-29).

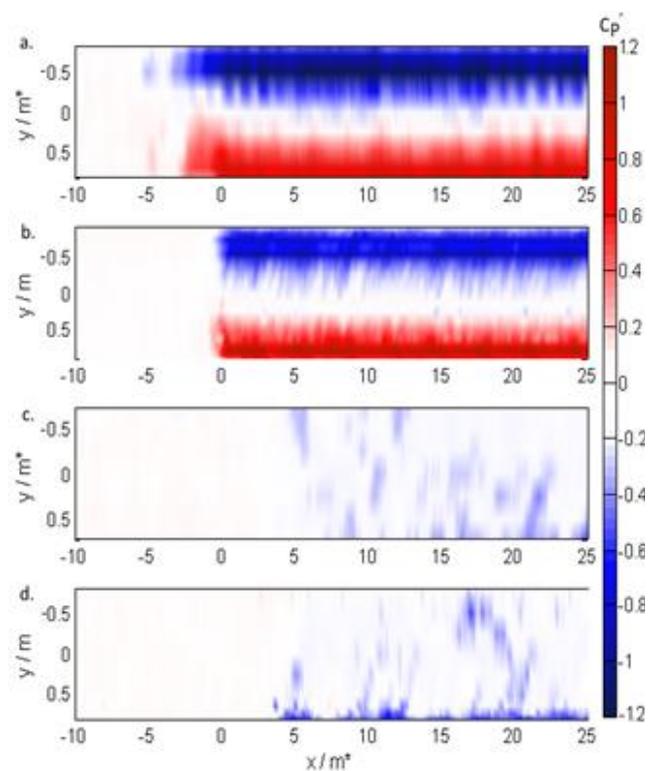


Abbildung 6-56: Modellversuch (a, c) und Versuch mit Originalfahrzeug (b, d), instationärer Druck an der vorderen Stoßstange (a, b) und an der hinteren Stoßstange (c, d).

Der deutlichste Unterschied ist das Ausmaß der Druckänderungen an der vorderen Stoßstange, – sowohl lee- als auch luvseitig – die beim bewegten Modell um ca. 20 % größer sind als bei den Fahrversuchen mit dem Originalauto. Eine mögliche Erklärung dafür könnten kleine Unterschiede im relativen Anstellwinkel sein, die bei beiden Experimenten in Wirklichkeit einem Winkel von $\beta = 30 \pm 2^\circ$ entsprechen.

Die Genauigkeit des relativen Anstellwinkels hängt von der Geschwindigkeit des Fahrzeugs und der Strömung des Windkanals ab. Änderungen im Anstellwinkel könnten, wie zuvor gezeigt, einen Einfluss auf die Druckänderungen haben. Eine alternative Erklärung könnten die unterschiedlichen Strömungsbedingungen der jeweiligen Windkanäle (Turbulenz, Einheitlichkeit der Strömung) darstellen, die sich hier auswirken.

Abbildung 6-56 zeigt die zeitliche Veränderung des schwankenden Oberflächendrucks an der vorderen und hinteren Stoßstange für beide Experimente in einem Konturplot. Dort sind ähnliche Tendenzen zu

beobachten: Ein deutlicher Druckanstieg auf der Luvseite und ein stärkerer Druckabfall auf der Leeseite der vorderen Stoßstange. Auch große willkürliche Druckschwankungen, die ihren Ursprung auf der Luvseite zu haben scheinen, treten bei beiden Experimenten auf.

6.6.6 Analyse der Kräfte

Ähnlich wie bei den oben vorgestellten Ergebnissen der Experimente mit Fahrzeug in Originalgröße, erhält man durch die Einbeziehung des Oberflächendrucks Informationen zum instationären Strömungswiderstand und zur Seitenkraft. Diese Analyse liefert Informationen zur allgemeinen instationären Reaktion des Fahrzeugs. Bei den Modellversuchen wurde der Druck an 16 Positionen (vordere und hintere Stoßstange) ausgewertet, um Größen analog zu Widerstand und Seitenkraft zu bestimmen. Die gleichen Positionen wurden bei den Messungen mit dem Originalfahrzeug verwendet, um vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Die zur Analyse der Kräfte ausgewerteten Druckbohrungen, ihre entsprechend ausgerichteten Druckvektoren und die daraus resultierenden zeitlich gemittelten Kräftevektoren für $\beta = 0^\circ$ und $\beta = 30^\circ$ sind in Abbildung 6-57 dargestellt.

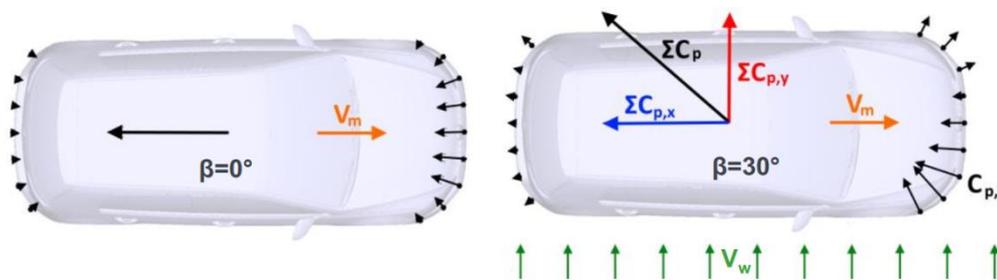


Abbildung 6-57: Druckpositionen, Normalenvektoren und die daraus resultierenden Kraft- und Momentberechnungen für Anstellwinkel von a) $\beta = 0^\circ$ und b) $\beta = 30^\circ$.

Abbildung 6-58 zeigt den instationären Widerstand und die Seitenkräfte, sowohl für die Experimente mit dem beweglichen Modell in verkleinertem Maßstab als auch für die Messungen mit dem Originalfahrzeug. Die Ergebnisse sind als Kraftänderung bezogen auf die Gegebenheiten für den Fall $\beta = 0^\circ$ dargestellt. Das Fahrzeug erfährt beim Einfahren in den Seitenwind zunächst eine Abnahme des Strömungswiderstands, gefolgt von einem Anstieg, bevor schließlich ein stabiler Wert erreicht wird. Diese Tendenz wird bei größeren Anstellwinkeln noch deutlicher. Die Experimente mit dem verkleinerten Modell und dem Fahrzeug in Originalgröße können für die Fälle mit den Anstellwinkeln $\beta = 22$ und 30° verglichen werden. Bei beiden Experimenten ist die Stärke der Ab- und Zunahme ähnlich. Dieses Verhalten könnte mit einem quasi-statischen Modell nicht erfasst werden. Vergleichbar mit den Ergebnissen für den Druck, unterscheidet sich die Dauer bis die instationären Effekte auftreten für die beiden Experimente leicht. Das ist möglicherweise auf unterschiedliche Scherschichtbreiten und die Strömungsbedingungen in den Windkanälen zurückzuführen.

Auch der instationäre Verlauf der Seitenkraft wird in der Auftragung über der Zeit deutlich. Ein deutliches Überschwingen (bezogen auf den finalen stabilisierten Wert) der Seitenkraft tritt jedoch nur bei größeren Anstellwinkeln von $\beta = 35 - 45^\circ$ auf. Bei kleineren Anstellwinkeln braucht die Seitenkraft länger, um sich zu entwickeln. Das könnte eventuell mit Hilfe einer quasi-statischen Modellierung nachgebildet werden. Sowohl die Experimente im verkleinerten Maßstab als auch im Vollmaßstab weisen ähnliche instationäre Seitenkräfte für die Fälle $\beta = 22^\circ$ und 30° auf. Bei der Analyse der Versuche mit dem Fahrzeug in Originalgröße (siehe oben), bei denen 58 Druckbohrungen verwendet wurden, zeigt sich ein mögliches Überschwingen für die kleineren Anstellwinkel. So bedeutet die geringere Anzahl an Druckbohrungen bei den Versuchen mit dem Modell im verkleinerten Maßstab eine gewisse Einschränkung insofern als der globale Seitenwindeffekt nicht vollständig erfasst werden kann.

Die ausgewerteten Kräfte aus den Versuchen mit dem bewegten Modell zeigen, – genau wie die bereits vorgestellten Ergebnisse aus den Versuchen mit dem Originalfahrzeug – dass die bei der Analyse des instationären Oberflächendrucks festgestellten lokalen instationären Eigenschaften generell einen deutlichen Einfluss auf das Fahrzeug haben, wenn es einen instationären Seitenwind erfährt. Die Übereinstimmung zwischen den Resultaten der beiden Experimente stärkt die Belastbarkeit der Ergebnisse. Sowohl am Versuchsfahrzeug als auch am bewegten Fahrzeugmodell unter Laborbedingungen wurden instationäre Drücke identifiziert, deren globaler Effekt auf das Fahrzeug nicht mit quasi-statischen Methoden nachgebildet werden konnte. Auch in den Windkanalexperimenten wurden für die sich kontinuierlich verändernde Anströmung Effekte identifiziert, die nicht mit Hilfe von quasi-stationären Ansätzen nachgebildet werden konnten. Die einzeln betrachteten impulsartigen Seitenwinde erlauben zusätzliche Rückschlüsse auf die Effekte, die die instationäre Strömung – die als eine Kombination vieler Impulse betrachtet werden kann – beeinflussen. Die großen Gemeinsamkeiten zwischen der Seitenwindanlage auf der Teststrecke und der TSG mit bewegtem Fahrzeugmodell im Seitenwindmodul etablieren die Versuchsanlage TSG als eine praktikable Möglichkeit für Untersuchungen von instationärer Aerodynamik an Fahrzeugen unter impulsartigem Seitenwind. Auf Grund der Ergebnisse sind auch Folgeuntersuchungen für Interaktionen mit Straßeninfrastrukturen (z.B. Tunnel oder Brücken) oder Straßenrandobjekten (z.B. Schilder, Bepflanzungen, Randfahrer) mit der TSG möglich.

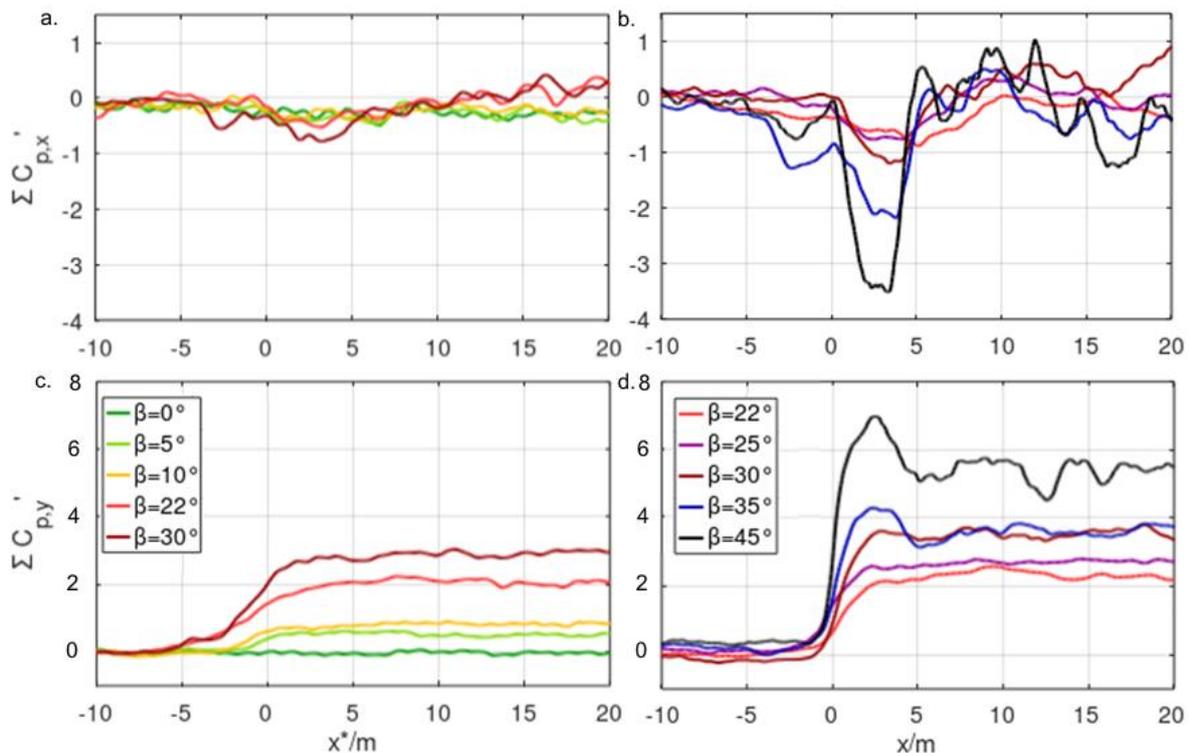


Abbildung 6-58: Instationärer Widerstand (a, b) und Seitenkraft (c, d) ausgewertet basierend auf den Druckmessungen der am DLR durchgeführten Experimente mit dem bewegten Modell (a, c) und für die auf der BMW-Teststrecke durchgeführten Experimente mit dem Originalfahrzeug (b, d).

7 Ergebnisse aus den numerischen Simulationen

In der numerischen Simulation wurden verschiedene Fahrsituationen in verschiedenen Untersuchungsumgebungen nachgestellt. Die Resultate der numerischen Simulationen mit Simulia PowerFLOW® und OpenFOAM sind im Folgenden beschrieben. Dabei sind die Ergebnisse der beiden Simulationstools in einzelne Kapitel unterteilt.

7.1 Simulia PowerFLOW®

Als Grundlage für Untersuchungen instationärer Anströmungen wurde zunächst der virtuelle Golf VII unter stationären Anströmbedingungen mit Simulia PowerFLOW® aerodynamisch charakterisiert. Dazu wurden die in Abschnitt 0 beschriebenen Randbedingungen verwendet. Die Ergebnisse der stationären numerischen Simulation bei einer Anströmgeschwindigkeit von 27,8 m/s sind im Vergleich zu Messungen im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal in Abbildung 7-1 dargestellt.

Die Trends der Luftkraftbeiwerte stimmen gut überein. Der Luftwiderstandsbeiwert zeigt ein Delta von 0,003 zwischen Experiment und numerischer Simulation. Damit ist die Vergleichbarkeit der Untersuchungseinrichtungen sehr gut. Die Auftriebsbeiwerte an der Fahrzeugfront und -heck zeigen Abweichungen $\leq 0,008$.

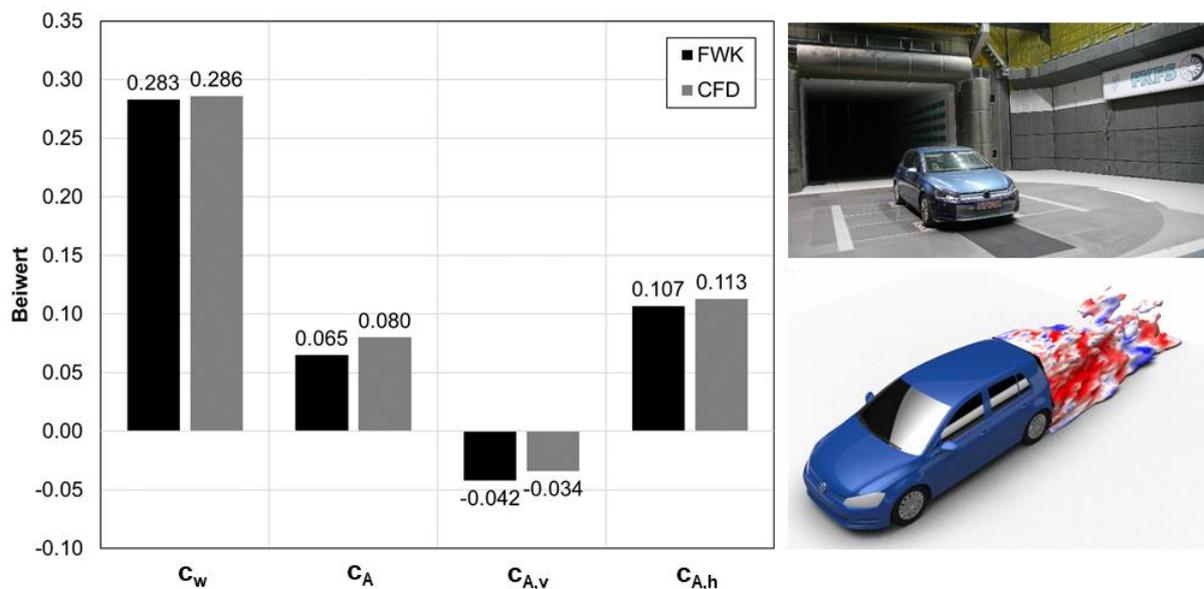


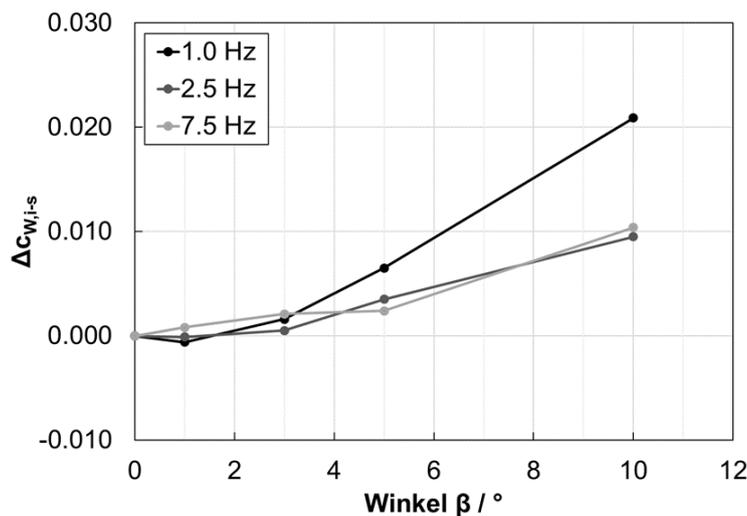
Abbildung 7-1: Vergleich der aerodynamischen Beiwerte des Versuchsfahrzeugs ohne Kühlluft (links) im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal (Windkanal) und der numerischen Simulation mit Simulia PowerFLOW® unter stationärer, grader Anströmung bei einer mittleren Anströmgeschwindigkeit von 27,8 m/s und Abbildungen der Versuchsfahrzeuge im Windkanal und der numerischen Simulation (rechts).

Die Resultate zeigen eine gute Vergleichbarkeit der Untersuchungseinrichtungen und bilden damit die Ausgangsbasis für weitere Studien. Im weiteren Verlauf der Arbeit werden die instationären Luftwiderstände des Versuchsfahrzeugs mit instationärer Schräganströmung untersucht. Ebenso wird die Instationarität aller Raumrichtungen in der numerischen Simulation abgebildet und damit der Einfluss von Schwankungen der Anströmgeschwindigkeit untersucht.

7.1.1 Numerische Simulation von instationärer Schräganströmung

Die numerischen Simulationen der instationären Schräganströmung werden in diesem Abschnitt, vergleichbar zur Anregung des FKFS *swing*[®]-Systems im Windkanal, als gleichförmige instationäre Anströmung umgesetzt. Bei diesem Ansatz wird die Strömungsgeschwindigkeit lediglich in der y-Richtung variiert. Die Strömungsgeschwindigkeit in x- und z-Richtung werden als konstante vorgegeben. Dabei entspricht u der Fahr- und Anströmgeschwindigkeit von 27,8 m/s (x-Richtung) und w = 0 m/s (z-Richtung). Die detaillierten Randbedingungen sind in Abschnitt 0 beschrieben.

Um die Auswirkungen der instationären Anströmung auf den Luftwiderstandsbeiwert des Versuchsfahrzeugs zu bestimmen wurde eine Parameterstudie durchgeführt. Dabei sind die Einflüsse von Sinussignalen mit verschiedenen Frequenzen (1,0 Hz / 2,5 Hz / 7,5 Hz) und verschiedenen Amplituden (1° / 3° / 5° / 10°) untersucht worden. Die Amplitude der Sinussignale entspricht dem Anströmwinkel β . Die unter der sinusförmigen instationären Anströmung resultierenden Luftwiderstandsbeiwerte sind auf den Luftwiderstandsbeiwert der stationären, graden Anströmung normiert und in Abbildung 7-2



dargestellt.

Abbildung 7-2: Auswirkungen verschiedener sinusförmiger instationärer Anströmungen auf den Luftwiderstandsbeiwert, normiert auf den Luftwiderstandsbeiwert unter stationärer, grader Anströmung bei einer mittleren Anströmgeschwindigkeit von 27,8 m/s.

Im Bereich von 0 bis 3° sind die Auswirkungen auf den Luftwiderstand für alle Frequenzen sehr gering. Bei instationären Anregungen mit Amplituden von 5° und 10° zeigt sich ein steigender Einfluss auf den Luftwiderstandsbeiwert. Dieser ist für die Frequenzen von 2,5 und 7,5 Hz vergleichbar. Bei Anregung mit einer Frequenz von 1,0 Hz bei einem Winkel von 10° sind im Vergleich zu den anderen Konfigurationen die größten Auswirkungen sichtbar. Bei Amplituden von 5° und 10° steigt der Einfluss der Anregung auf den Luftwiderstandsbeiwert für geringe Frequenzen (1,0 Hz). Für alle Frequenzen ergibt sich eine Abhängigkeit des Luftwiderstands von der Amplitude der Anregung.

Die Variation der Amplituden der Anströmwinkel, die gerade mit sinusförmiger instationärer Anströmung untersucht wurde, ist ebenfalls in den generischen Signalen aus den Straßenfahrten enthalten. Mit zunehmender Standardabweichung des SF Signals steigt die mittlere Amplitude (Anströmwinkel β) und damit die Intensität des Signals.

Ebenso, wie in den experimentellen Untersuchungen im Modell- und Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal, ist der Luftwiderstandsbeiwert unter Verwendung der generischen Signale mit der numerischen Simulation berechnet worden. Die Ergebnisse sind in Abbildung 7-3 dargestellt. Der Trend der sinusförmigen Anregung zeigt sich auch bei diesen Untersuchungen: Mit steigendem Anströmwinkel steigt der instationäre Luftwiderstandsbeiwert an. Beim Vergleich der numerischen Simulation mit den verschiedenen

Untersuchungsumgebungen zeigt sich der gleiche Trend der Resultate. Der Einfluss der instationären Anströmung auf den Luftwiderstandsbeiwert als Differenz zur stationären Anströmung liegt für die numerischen Simulationen zwischen Modellwindkanal und den Ergebnissen der skalierten 1:1 Messungen im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal.

Wird die Differenz zwischen $SF2.2$ und $SF2.9$ als Kennzahl gebildet, so befinden sich die Werte aller Untersuchungsumgebungen zwischen 0,004 und 0,006 und stimmen damit sehr gut überein. Unter Berücksichtigung des $SF2.5$ Signals verändert sich die Sachlage. In der numerischen Simulation beeinflusst dieses Signal den Luftwiderstandsbeiwert stärker als im Modellwindkanal und weniger stark als der Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal.

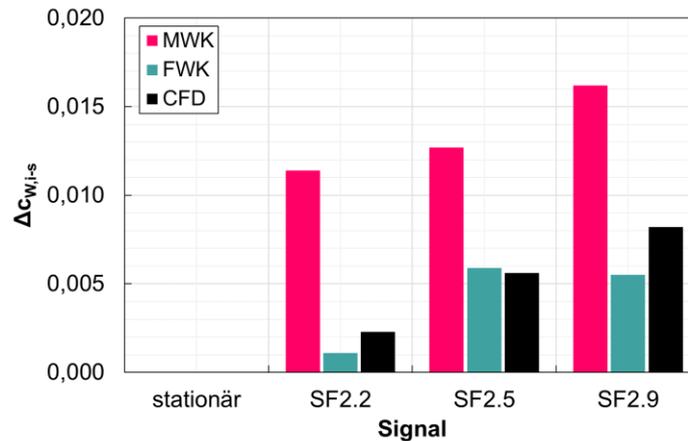


Abbildung 7-3: Vergleich der Luftwiderstandsbeiwerte mit instationärer Anströmung der generischen Signale im Modellwindkanal (MWK), Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal (FWK) und Simulia PowerFLOW® (CFD) normiert auf die Luftwiderstandsbeiwerte der stationäre Anströmung.

Die Ergebnisse der Untersuchungen um Maßstab 1:1 (FWK / CFD) zeigen vergleichbare Werte für die Signale SF2.2 und SF2.5. Der Luftwiderstandsbeiwert unter Verwendung des Signals SF2.9 zeigt zwischen Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal und numerischer Simulation eine größere Abweichung. Die verwendeten Signale für die experimentellen und numerischen Untersuchungen sind gleich. Jedoch wird in der numerischen Simulation ein deutlich kürzerer Zeitraum nachgestellt. Dies könnte eine Abweichung verursachen, kann jedoch als gering einzustufen, da die Intensität der Signale über die gesamte Länge vergleichbar ist.

Mit den Ergebnissen der verschiedenen Untersuchungseinrichtungen können verschiedene Effekte identifiziert werden. Zum einen steigert die instationäre Anströmung steigert bei allen Untersuchungen den Luftwiderstandsbeiwert, zum anderen lässt sich der Trend zunehmender Luftwiderstandsbeiwerte mit steigender Instationarität der Anströmung identifizieren. Dies zeigt sich in den verwendeten Untersuchungsumgebungen.

7.1.2 Numerische Simulation instationärer Anströmungen in allen Raumrichtungen

Unter definierten Fahrsituationen auf der Teststrecke erfährt das Versuchsfahrzeug Strömungssituationen die, wie in Abschnitt 4.1.3 beschrieben, neben der Schräganströmung ebenfalls Schwankungen in x- und in geringem Maße auch in z-Richtung besitzen. Die Randbedingungen der Fahrten auf der Teststrecke können in der numerischen Simulation nachgestellt werden. Verwendet werden dazu die Messdaten der freien Fahrt auf der Teststrecke - Konstantfahrt (KF) und der Hinterherfahrt in 50 m Abstand zum Transporter (HF). Die Anströmgeschwindigkeit in der numerischen Simulation entspricht der Fahrgeschwindigkeit von 27,8 m/s auf der Teststrecke.

Die numerische Simulation der beschriebenen Fahrversuche wird mit zwei verschiedenen Ansätzen modelliert und untersucht. Zum einen die *gleichförmige instationäre Anströmung* und zum anderen die *verteilt instationäre Anströmung*. Die Randbedingungen der beiden Ansätze sind im Abschnitt 0 beschrieben.

Gleichförmig instationäre Anströmung

Die bei der *gleichförmigen instationären Anströmung* mit Schwankungen der u-Komponente in der Simulation vorgegebenen Einströmbedingungen werden mit geringen Abweichungen bis kurz vor das Fahrzeug gut abgebildet. Auf der Fahrzeugoberfläche verursacht dieser Ansatz jedoch eine deutliche Steigerung der Schwankungen der Druckbeiwerte. Diese Auswirkungen der *gleichförmigen instationären Anströmung* der Konstant- (KF) und Hinterherfahrt (HF) auf die Druckbeiwerte und deren Schwankungen auf der Fahrzeugoberfläche sind für den Mittelschnitt in Abbildung 7-4 (links) dargestellt. Auffällig sind die Verläufe der Schwankungen der Druckbeiwerte. Diese zeigen relativ konstante Werte und weisen nicht die von den Fahrversuchen bekannten Charakteristiken auf (siehe Kapitel 5.1 und 5.2).

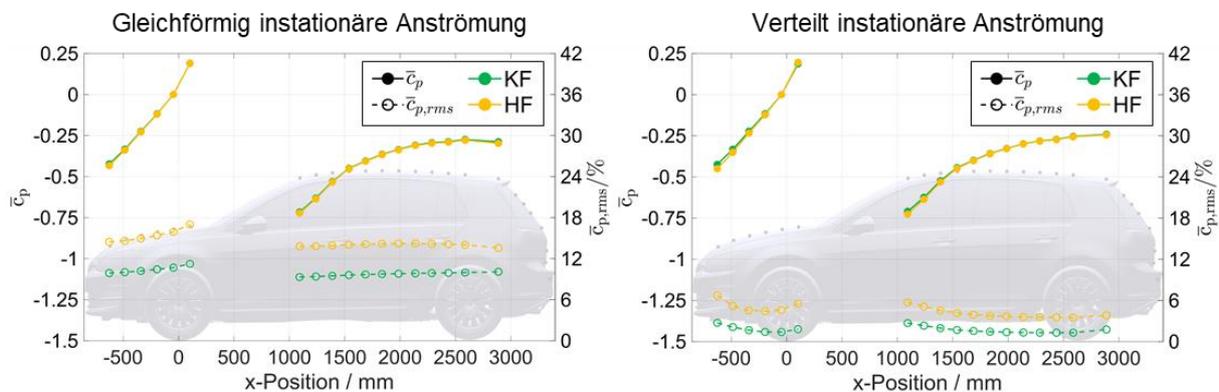


Abbildung 7-4: Mittlere Druckbeiwerte und deren Schwankung entlang des Mittelschnitts der Fahrzeugmotorhaube und des –dachs für die gleichförmige instationäre Anströmung (links) und die verteilt instationäre Anströmung (rechts) bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 27,8 m/s.

Mit dem Ansatz der *gleichförmigen instationären Anströmung* können die Oberflächendruckschwankungen der Fahrversuche damit nicht abgebildet werden. Der Einsatz dieser Methode für die Simulation der instationären Anströmung ist damit nicht zielführend und wurde nicht weiterverfolgt.

Verteilt instationäre Anströmung

Mit der *verteilt instationären Anströmung* werden aus den Strömungsbedingungen der Fahrversuche Randbedingungen extrahiert und mit dem Turbulenzgenerator in der Simulation nachgestellt. Die Ergebnisse der Druckbeiwerte und deren Schwankungen im Mittelschnitt der Fahrzeugoberfläche sind in Abbildung 7-4 (rechts) dargestellt. Die Resultate der Schwankungen der Druckbeiwerte der verteilt instationären Anströmung zeigen im Vergleich zum Ansatz mit der *gleichförmigen instationären Anströmung* bessere Verläufe und besitzen eine vergleichbare Charakteristik zu den Fahrversuchen. Die Größenordnung der Schwankung der Druckbeiwerte der Konstant- und Hinterherfahrt werden mit der numerischen Simulation bisher nicht erreicht, zeigen aber vielversprechende Ergebnisse (siehe Abbildung 5-18).

Auf Basis dieser Ergebnisse werden die Einflüsse auf die Fahrzeugaerodynamik anhand der zwei Anströmbedingungen Konstantfahrt (KF) und Hinterherfahrt detailliert untersucht. Die Luftwiderstandsbeiwerte der instationären Anströmbedingungen sind in Abbildung 7-5 (links) dargestellt und auf die

Simulation unter stationärer Anströmung normiert. Der Luftwiderstandsbeiwert der Anströmbedingungen der Konstantfahrt (*KF*) reduziert sich um fast 0,003, während bei der Hinterherfahrt (*HF*) eine Steigerung um 0,013 festzustellen ist.

In Abbildung 7-5 (rechts) ist die Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts der instationären Anströmbedingungen in Fahrzeuginnenrichtung abgebildet. Um die Unterschiede zur stationären Simulation verdeutlichen zu können sind die Luftwiderstandsbeiwerte der instationären numerischen Simulationen auf die stationären Ergebnisse referenziert und als Differenz dargestellt.

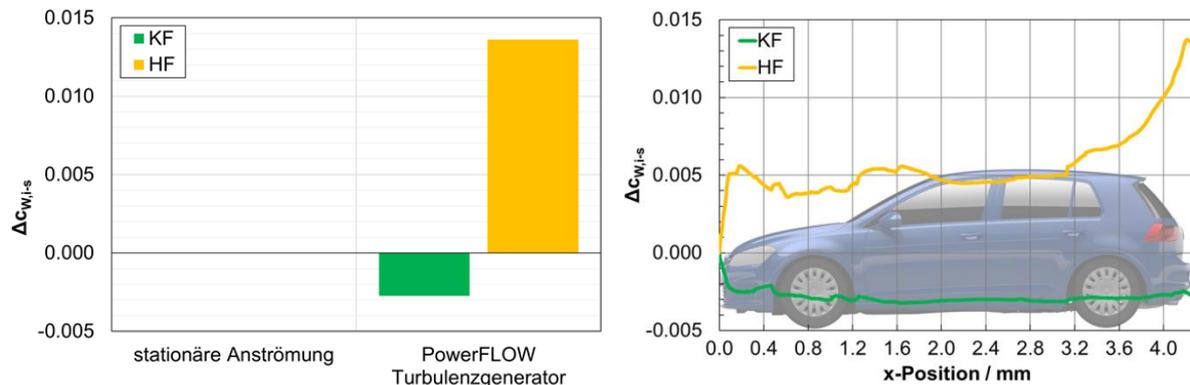


Abbildung 7-5: Luftwiderstandsbeiwerte für die mit dem PowerFLOW® Turbulenzgenerator simulierte Fahr-situation der Konstantfahrt und Hinterherfahrt in 50 m Abstand zum Transporter (links) und die zugehörige Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts entlang der Fahrzeuglängsachse (rechts).

Es sind sowohl für die Konstantfahrt (*KF*) als auch für die Hinterherfahrt (*HF*) Unterschiede im Luftwiderstandsbeiwerts an der Fahrzeugfront zu identifizieren. Diese sind auf von der simulierten Fahrgeschwindigkeit abweichende Anströmgeschwindigkeiten zurückzuführen. Da die Strömungsgeschwindigkeit im Simulationsvolumen orts- und zeitabhängig ist, treffen verschiedene Anströmgeschwindigkeiten auf das Versuchsfahrzeug. Im Vergleich zur Fahrgeschwindigkeit sind diese sowohl höhere als auch geringere Anströmgeschwindigkeiten und haben damit Einfluss auf den Luftwiderstandsbeiwert.

Die Bestimmung der tatsächlichen Anströmgeschwindigkeit, die das Versuchsfahrzeug zu jedem Zeitpunkt erfährt, ist daher nicht ohne weiteren Aufwand möglich. Für die Ermittlung der dargestellten Luftwiderstandsbeiwerte wird die über die Simulationsdauer gemittelte Anströmgeschwindigkeit verwendet. Durch die begrenzte Simulationszeit kommt es bei der tatsächlichen Anströmgeschwindigkeit des Fahrzeugs zu Abweichungen zum eingestellten, mittleren Anströmgeschwindigkeit. Dies könnte nur durch eine deutlich längere Simulationsdauer korrigiert werden.

Aus diesem Grund sollte die Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts isoliert von den Abweichungen an der Fahrzeugfront betrachtet werden. Verglichen mit der stationären Anströmung hat für die Konstantfahrt (*KF*) die instationäre Anströmung nur einen geringen Einfluss den Luftwiderstandsbeiwert.

Für die Anströmbedingungen der Hinterherfahrt (*HF*) zeigt sich ein anderes Verhalten. Beginnend am Radhaus der Hinterachse bis zum Fahrzeugheck steigt der Luftwiderstandsbeiwert im Vergleich zur stationären Simulation stetig an. Dieses Verhalten deutet darauf hin, dass am Fahrzeugheck die instationären Anströmbedingungen die Fahrzeugumströmung so beeinflussen, dass sich der Luftwiderstandsbeiwert vergrößert.

Eine detaillierte Ansicht der statischen Druckbeiwerte auf der Fahrzeugoberfläche für beide Anströmbedingungen und an der Fahrzeugfront ist in Abbildung 7-6 und für das Fahrzeugheck in Abbildung 7-7 dargestellt. An der Fahrzeugfront ist zu erkennen, dass sich die Oberflächendruckverteilung zwischen

Konstant- (*KF*) und Hinterherfahrt (*HF*) vergrößert. Bei der Hinterherfahrt (*HF*) ist das Gebiet hoher statischer Druckbeiwerte größer als bei der Konstantfahrt (*KF*). Dies korreliert mit den Ergebnissen der Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts.

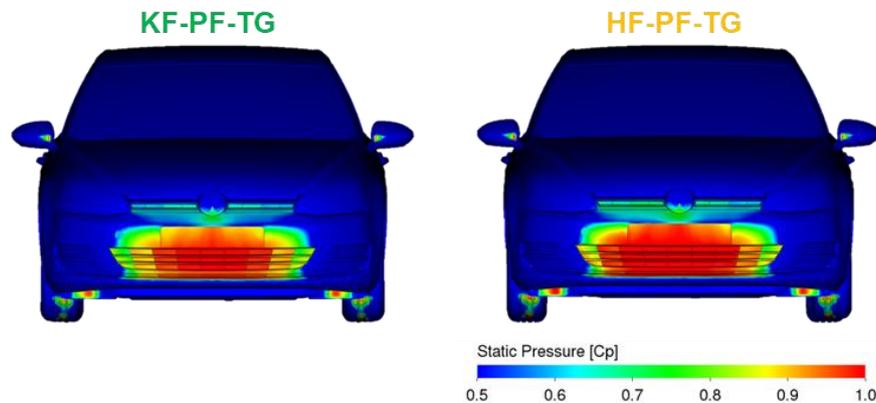


Abbildung 7-6: Druckbeiwerte der Fahrzeugoberfläche an der Front für die mit dem PowerFLOW® Turbulenzgenerator simulierte Fahrsituation der Konstantfahrt und Hinterherfahrt in 50 m Abstand zum Transporter.

Beim Vergleich der statischen Druckbeiwerte am Fahrzeugheck ist ebenfalls ein Unterschied für die beiden instationären Anströmsituationen festzustellen. Die statischen Druckbeiwerte der Fahrzeugoberfläche der Anströmung der Hinterherfahrt (*HF*) unterscheiden sich deutlich von der Konstantfahrt (*KF*). Ein geringer Basisdruck zeigt sich bei der Hinterherfahrt (*HF*) im Vergleich zur Konstantfahrt (*KF*). Im Bereich des Kofferraumdeckels unterscheiden sich die statischen Oberflächendruckverteilungen am deutlichsten.

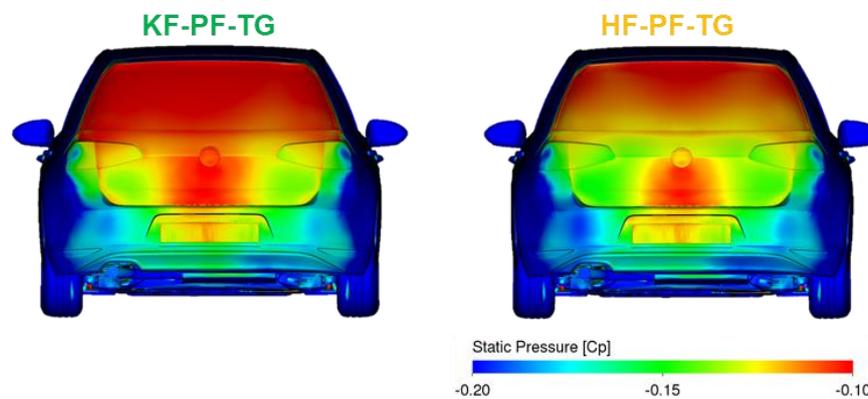


Abbildung 7-7: Druckbeiwerte der Fahrzeugoberfläche am Heck für die mit dem PowerFLOW® Turbulenzgenerator simulierte Fahrsituation der Konstantfahrt und Hinterherfahrt in 50 m Abstand zum Transporter.

Diese Resultate stimmen ebenfalls mit den Mechanismen der Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts überein. Durch die instationäre Umströmung wird die Ablösung am Fahrzeugheck beeinflusst. Der Ablösepunkt ist unter stationären Anströmbedingungen relativ konstant. Bei instationärer Anströmung variiert dieser jedoch deutlich und beeinflusst damit das Nachlaufgebiet des Fahrzeugs. Durch den veränderten Nachlauf wird bei den instationären Anströmbedingungen der Basisdruck verändert. Diese Veränderungen des Basisdrucks wirken sich direkt auf den Luftwiderstandsbeiwert aus. Dieser Einfluss ist besonders unter den Randbedingungen der Hinterherfahrt (*HF*) zu erkennen.

Bei den Untersuchungen mit instationärer Anströmung in allen Raumrichtungen konnten mit der *verteilt instationäre Anströmung* vergleichbare Ergebnisse zu den Fahrversuchen vorgefunden werden. Die

Auswirkungen der instationären Anströmgeschwindigkeiten resultieren in Veränderungen des Luftwiderstandsbeiwerts. Bei der Konstantfahrt (KF) konnten neben dem Einfluss variierender Anströmgeschwindigkeiten nur geringe instationäre Einflüsse identifiziert werden. Hingegen traten bei der Hinterherfahrt (HF) im Bereich des Fahrzeughecks instationäre Einflüsse auf.

Dieser Zusammenhang stützt die Erkenntnisse, die mit instationärer Schräganströmung durchgeführten Versuche und numerischen Simulationen, dass mit zunehmender Intensität der Anströmbedingungen der Luftwiderstand tendenziell steigt.

7.2 OpenFOAM

Neben den Untersuchungen mit der kommerziellen Software PowerFLOW® wurden CFD-Simulationen mit der frei verfügbaren, quellcodeoffenen Software OpenFOAM durchgeführt. Die Finite-Volumen-Methode OpenFOAM bietet gegenüber der Lattice-Boltzmann-Methode die Möglichkeit den Quelltext des Programms sowohl einzusehen als auch zu verändern. Es ist also im Gegensatz zu kommerzieller Software kein Black-Box-System.

Basierend auf der Möglichkeit den Quelltext zu verändern, wurde in der vorliegenden Studie folgender, neuer Ansatz entwickelt und getestet: Die Messergebnisse aus den Fahrversuchen für den Fall der Hinterherfahrt mit 50 m Abstand wurden zwischen den Sondenpositionen mittels radialer Basisfunktion interpoliert. Die interpolierten Ergebnisse wurden für die Bestimmung der Randbedingungen der OpenFOAM-Simulationen im y-z-Bereich des Arrays verwendet. Außerhalb dieses Bereiches wurden die Ergebnisse der Konstantfahrt genutzt, um eine neutrale, atmosphärische Grenzschicht als Randbedingung zu entwickeln. Der Übergangsbereich zwischen den beiden unterschiedlichen Randbedingungen wurde durch eine Übergangsfunktion geglättet.

Neben der Hinterherfahrt wurde auch die Windkanalumgebung mit Bodensimulation, Absaugung und Klappensystem simuliert. Hierzu wurde die Flapbewegung mit einem Ausschlag von 10° und einer Frequenz von 10 Hz simuliert.

Die OpenFOAM-Simulation der Strömung im Windkanalermöglicht eine Vorhersage der Auswirkungen der instationären Anströmung mit definierten, gut bekannten Randbedingungen, während für die OpenFOAM-Simulation der Umströmung bei Hinterherfahrt im Fahrversuch auf der Teststrecke ein großer Aufwand zur Bestimmung der Randbedingungen betrieben werden musste. Die OpenFOAM-Simulation der Umströmung im Windkanal kann anschließend mit den Messergebnissen der Windkanalversuche verglichen werden. Basierend auf der OpenFOAM-Simulation sind zudem erste Abschätzungen der Auswirkung einer instationären Anströmung möglich, ohne dass ein physisches Modell vorhanden sein muss.

7.2.1 Simulation der Strömung bei der Hinterherfahrt auf der Teststrecke

Zur Erzeugung der Einströmrandbedingungen für die Simulation der Hinterherfahrt auf der Teststrecke wurden die Ergebnissen der Messungen an den 11 Fünf-Loch-Sonden mittels radialer Basisfunktion in dem inneren y-Bereich, über den sich das Array erstreckt, interpoliert. Es folgt dann ein Übergang in einen Außenbereich, der durch eine atmosphärische Grenzschicht basierend auf den Daten der Konstantfahrt definiert ist. Eine genaue Beschreibung des dieser Vorgehensweise ist in Kapitel 4.3.2 enthalten. Diese Vorgehensweise zur synthetischen Erzeugung der Geschwindigkeitsfelder stromaufwärts des Fahrzeuges (Anströmung) wird im Folgenden als HF-Randbedingung bezeichnet. Zum Vergleich wurde die stationäre Simulation mit einem Blockprofil (BP-Randbedingung) verwendet. In diesem Kapitel

wird die OpenFOAM-Simulation der Umströmung bei der Hinterherfahrt sowohl hinsichtlich der Vorhersage der Strömung um das Fahrzeug und des aerodynamischen Widerstandes als auch auf den Widerstand und die Drücke diskutiert.

Zunächst wird qualitativ bewertet, wie sehr sich die Strömungsstrukturen in der Simulation für die BP-Randbedingung und die HF-Randbedingung verändern und ob ein Einfluss auf das Fahrzeug erkennbar ist. Abbildung 7-8 veranschaulicht die qualitativen Unterschiede der Lösungen, die unter Verwendung der BP- und HF-Randbedingungen berechnet wurden. Links ist die Lösung für die Anströmung mit BP-Randbedingung abgebildet, rechts die Lösung für die HF-Randbedingung. In der Abbildung werden sowohl die momentane Wirbelstärke entlang des Mittelschnitts des Fahrzeugs (x-z-Ebene) bei $y = 0$ m als auch die mittleren Druckkoeffizienten an der Fahrzeugoberfläche für die beiden Strömungsfelder dargestellt. Die farblichen Skalierungen für die Wirbelstärke und den Oberflächendruckbeiwert gelten dabei für beide Abbildungen gleichermaßen.

In der Anströmung für die HF-Randbedingung ist die Wirbelstärke gegenüber der BP-Randbedingung deutlich erhöht. Das liegt daran, dass im Fall der BP-Randbedingung erst in der Nähe des Fahrzeugs signifikante Geschwindigkeitsgradienten in der Strömung erzeugt werden. Die HF-Randbedingung zeigt hingegen bereits in der Anströmung größere Geschwindigkeitsgradienten, die zu einer erhöhten Wirbelstärke führen. Diese Wirbelstärken bleiben stromabwärts erhalten. Lediglich im direkten Nachlauf und im Grenzschichtbereich an der Fahrzeugoberfläche befinden sich die Wirbelstärken für beide Randbedingungen auf einem ähnlichen Niveau.

Die Hauptunterschiede in der Oberflächendruckverteilung der OpenFOAM-Simulationen mit den HF- und BP-Randbedingungen sind an der Vorderseite des Fahrzeugs zu sehen. Die HF-Randbedingung weist einen höheren mittleren Druckbeiwert an der Vorderseite des Fahrzeugs und entlang der Windschutzscheibe auf. Diese Druckunterschiede sind sowohl auf den niedrigeren dynamischen Referenzdruck auf Grund der geringeren Anströmgeschwindigkeit (siehe Tabelle 7-1 für einen Vergleich der Anströmgeschwindigkeiten) als auch auf den Einfluss der – sich vom Einlass stromabwärts zum Fahrzeug bewegenden – instationären Strömung zurückzuführen.

Die Lösungen für die unterschiedlichen Randbedingungen zeigen, dass auch stromabwärts vom Einlass zum Fahrzeug hin noch ein deutlicher Einfluss auf die Anströmbedingungen durch die instationären Randbedingungen zu erkennen ist. Vor dem Fahrzeug werden unterschiedliche Strömungsstrukturen erzeugt, wodurch sich die Druckverteilung auf der Fahrzeugoberfläche ändert.

Bei den Ergebnissen muss berücksichtigt werden, dass die HF-Randbedingung mehr Zeitschritte benötigt, um einen statistisch stabilen Zustand zu erreichen. Für die konventionelle, stationäre Anströmung (BP-Randbedingung) entspricht der statistisch stabile Zustand der Zeit, in der die anfänglichen, instationären Strömungsbedingungen nicht mehr vorhanden sind. Für die HF-Randbedingung ist jedoch mehr Zeit nötig, damit sich in der Anströmung statistisch stationäre Bedingungen ergeben. Ursache hierfür ist das instationäre Strömungsfeld aus den Fahrversuchen, das als Randbedingung verwendet wird. Damit sich um das Fahrzeug herum ein statistisch stationäres Strömungsfeld bilden kann, werden mindestens 15 konvektive Zeiteinheiten auf Basis der Fahrgeschwindigkeit und der Länge des Versuchsfahrzeugs benötigt. Unter Berücksichtigung von weiteren 5 Sekunden (mindestens 10 Perioden der signifikantesten Frequenzen der Messungen auf der Teststrecke) beträgt die erforderliche Zeit zum Mitteln 6 s. Auf Grund der enormen Rechenzeitanforderungen, mussten die Berechnungen allerdings auf 2,7 s - 4 s reduziert werden. Dadurch sind einige statistischen Momente 2. Ordnung noch nicht vollständig konvergiert.

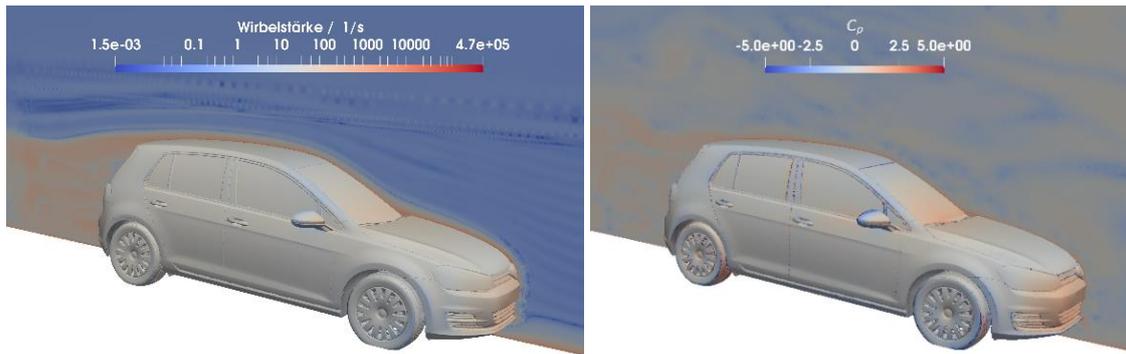


Abbildung 7-8: Vergleich der Wirbelstärken zum Zeitpunkt t mit den mittleren Oberflächendruckbeiwert c_p für die BP-Randbedingung (links, bei $t = 2,4$ s) und HF-Randbedingung (rechts, bei $t = 2,43$ s). Die Wirbelstärkenskala gilt für beiden x - z -Ebenen und die Skala der Druckbeiwerte gilt für beide dargestellten Fahrzeugoberflächen.

Anströmbedingungen

Die OpenFOAM-Simulation der Umströmung bei der Hinterherfahrt soll eine möglichst realistische Vorhersage der Anströmverhältnisse am Fahrzeug liefern. Es ist also wichtig, dass die wesentlichen Strömungsstrukturen aus der Hinterherfahrt auf der Teststrecke in der OpenFOAM-Simulation abgebildet werden können. In Abbildung 7-8 wurde gezeigt, dass diese sich für die BP-Randbedingung und die HF-Randbedingung unterscheiden. Um abschätzen zu können, wie gut die in den Fahrversuchen aufgelösten Strömungsstrukturen von den OpenFOAM-Simulationen nachgebildet werden können, werden zunächst die im Fahrversuch gemessenen Strukturen mit den Strukturen der OpenFOAM-Simulation mit HF-Randbedingung qualitativ verglichen.

In Abbildung 7-9 wird die u -Komponente in der Anströmung bei $z = 0,5$ m 1 m vor dem Fahrzeug dargestellt. Die u -Komponente ist in Querrichtung y und über die Zeit aufgetragen. In der oberen Abbildung sind die Ergebnisse aus den Messungen (M) dargestellt. Die untere Abbildung zeigt die Ergebnisse für die OpenFOAM-Simulation mit der HF-Randbedingung.

Bei der OpenFOAM-Simulation Umströmung bei der Hinterherfahrt wird die Geschwindigkeitskomponente u in der freien Anströmung im Vergleich zu den auf der Teststrecke gemessenen Werten am Rand ($y = \pm 1$ m) um etwa 20 % zu niedrig berechnet. Im Kern des Nachlaufs beträgt die Abweichung etwa 40 %. Geschwindigkeitsstrukturen sind in der Abbildung durch identische Konturniveaus der Geschwindigkeit gekennzeichnet. Obwohl es sich hierbei um eine qualitative Betrachtung handelt, ist diese Methode ausreichend, um den in der Strömung vorhandenen Maßstab der kleinsten Strukturen zu identifizieren. So ergibt sich bei $y = -0,1$ m und $t = 2,27$ s bei der Messung eine sehr niedrige Geschwindigkeit, die nicht von der OpenFOAM-Simulation bestätigt wird. Das gilt auch für die Strukturen bei $y = 0,5$ m und $t = 2,31$ s. Beide haben eine Breite von ca. 40 mm. Die Rekonstruktionsmethode verwendet allerdings ein Netz von 50 mm. Daher werden diese Strukturen von der OpenFOAM-Simulation nicht aufgelöst. Die Topologie der Strukturen mit einer Größe von über 100 mm wird in der OpenFOAM-Simulation nachgebildet. Dagegen gleichen die in der OpenFOAM-Simulation aufgelösten Strukturen in Punkto Größe und Topologie den gemessenen Strukturen.

Die Methode mit der neuen Randbedingung aus Konstant- und Hinterherfahrt erlaubt es also die wesentlichen Strukturen im Nachlauf nachzubilden, sofern diese eine Mindestgröße von 100 mm erreichen. Für eine bessere Auflösung muss das Netz für die Geschwindigkeitsrekonstruktion am Einströmrand verfeinert werden. Das würde den Rechenaufwand allerdings erheblich steigern.

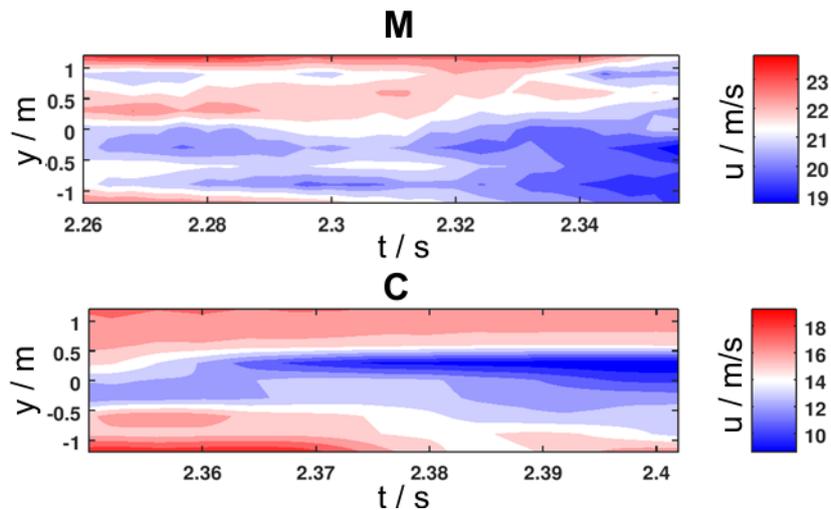


Abbildung 7-9: Entwicklung der Geschwindigkeitskomponente u in der Ebene der Sonden des Arrays in der Höhe $z = 0,5$ m für die Hinterherfahrt. M: Messergebnisse von der Teststrecke, C: Ergebnisse aus der CFD-Simulation.

Die in Abbildung 7-9 gezeigten Ergebnisse weisen auf eine etwas zu niedrige vorhergesagte Geschwindigkeit der Anströmung in der OpenFOAM-Simulation im Vergleich zu den Messergebnissen für den Fall der Hinterherfahrt hin. Im Folgenden soll quantitativ untersucht werden, wie groß die mittleren Geschwindigkeiten und ihre Fluktuationen sind. Außerdem wird untersucht wie groß die Abweichung zu den Versuchsfahrten für die unterschiedlichen Simulationen mit BP-Randbedingung beziehungsweise HF-Randbedingung bei unterschiedlichen Turbulenzintensitäten ist. Daher sind in Tabelle 7-1 die mittleren Geschwindigkeitskomponenten und die Standardabweichungen der Geschwindigkeitskomponenten für die OpenFOAM-Simulationen (C) und die Ergebnisse aus den Messungen (M) aufgeführt. Die Mittelung erfolgt für das Zeitsignal an den Sondenpositionen in 0,5 m Höhe. Die zeitlich gemittelten Ergebnisse an den einzelnen Sonden werden dann nochmals über die Sonden gemittelt. Die Geschwindigkeiten sind also sowohl über die Zeit als auch über die Breite gemittelt.

Die Geschwindigkeitskomponente u für die Simulation mit HF-Randbedingung bei einer Turbulenzintensität von $Tu = 6\%$ - dies entspricht der auf der Teststrecke gemessenen Turbulenzintensität - ist ungefähr 20% niedriger als in der Messung auf der Teststrecke. Die Lösung mit der BP-Randbedingung zeigt mit nur 9% Abweichung eine deutlich bessere Übereinstimmung für u mit den Messwerten aus den Fahrversuchen auf der Teststrecke. Allerdings fehlt in der BP-Randbedingung die Quergeschwindigkeitskomponente und die Standardabweichung der Querströmung ist wesentlich niedriger als die in den Fahrversuchen gemessenen Standardabweichungen. Die HF-Randbedingung zeigt hingegen eine deutlich stärkere mittlere Querströmung. Die mittlere w -Komponente wird in allen OpenFOAM-Simulationen im Vergleich zu den Messdaten unterschätzt.

Mit der BP-Randbedingung wird die Standardabweichung der Geschwindigkeitskomponente u um etwa 75% niedriger als in den Ergebnissen aus den Fahrversuchen auf der Teststrecke vorhergesagt. Auch die HF-Randbedingung führt zu einer kleineren Standardabweichung als im Experiment. Bei einer Turbulenzintensität von 6% – was den experimentellen Bedingungen entspricht – ist die Standardabweichung der u -Komponente 50% kleiner als in den Versuchen auf der Teststrecke. In den OpenFOAM-Simulationen kann die Standardabweichung durch Erhöhung der Turbulenzintensitäten gesteigert werden (vgl. $Tu_x = 2\%$; 6% ; 10%). Für die Geschwindigkeitskomponente v werden die Standardabweichungen bei hohen Turbulenzintensitäten leicht unterschätzt. Die Standardabweichung von w wird bei $Tu_x = 6\%$ korrekt vorhergesagt, eine veränderte Turbulenzintensität führt jedoch zu einer unterschätzten Standardabweichung.

Die mittleren Geschwindigkeiten spiegeln die Ergebnisse aus den Messungen noch nicht zuverlässig wider. Die mittleren Ergebnisse werden vermutlich noch durch Einzelereignisse beeinflusst, da die simulierte Zeit noch nicht lang genug war, um ein statistisch stationäres Ergebnis zu erreichen. Die Standardabweichung – als Indiz für die Schwankungsgröße – kann mit der HF-Randbedingung gut durch eine Veränderung der Turbulenzintensität angepasst werden. Es wurden gute Übereinstimmungen mit den Messwerten für die Simulation mit einer Turbulenzintensität von 6% erzielt.

Tabelle 7-1: Vergleich der berechneten/gemessenen Mittelwerte sowie der Standardabweichungen für die Geschwindigkeitskomponenten gemittelt über die Ergebnisse an den Sondenpositionen des Arrays. M(HF): Hinterherfahrt auf der Teststrecke, C(BP): CFD für die BP-Randbedingung, C(HF): CFD für die HF-Randbedingung bei unterschiedlichen Turbulenzintensitäten Tu_x .

	M(HF)	C(BP)	C(HF)	C(HF)	C(HF)
$Tu_x / \%$	6	6	2	6	10
Mittelwerte					
$u / \text{m/s}$	24,5	22,1	18,7	18,8	18,1
$v / \text{m/s}$	0,3	0,04	-1,9	-1,73	-2,7
$w / \text{m/s}$	1,6	-0,4	-0,5	-0,5	0,50
Standardabweichungen					
$u / \text{m/s}$	2,8	0,46	1,05	1,53	1,73
$v / \text{m/s}$	1,8	0,23	0,50	1,77	1,37
$w / \text{m/s}$	1,0	0,27	0,28	1,13	0,61

Um die Abweichungen in den Geschwindigkeiten und deren Ursachen besser nachvollziehen zu können, werden im Folgenden die räumlichen Verläufe der Geschwindigkeiten näher betrachtet. In Abbildung 7-10 sind Verläufe der Geschwindigkeitskomponenten für die HF-Randbedingung dargestellt. Im oberen Bildbereich ist das Strömungsfeld für die Geschwindigkeitskomponente u zum Zeitpunkt $t = 2,5 \text{ s}$ in der x - z -Ebene bei $y = 0 \text{ m}$ abgebildet. Im unteren Teil sind die an der mittleren Sondenposition gemessenen Geschwindigkeitskomponenten für $z = 0,5 \text{ m}$ über x aufgetragen. Diese Höhe entspricht der Höhe der unteren Sonden des Fahrzeugarrays. Im oberen Teil von Abbildung 7-10 ist der Kern des Nachlaufs unten links als ein Bereich niedriger Geschwindigkeit zu kennen. Der Bereich des ungestörten Kerns erstreckt sich stromabwärts vom Einlass über eine Länge von etwa 3 m. Damit wird die von Karimipanah [90] veröffentlichte Länge des Kerns um etwa 30% unterschätzt. Die geschätzte Ausbreitungsrate dy/dx des Nachlaufs beträgt 0,047, was nur minimal unter den in der Literatur angegebenen Werten von 0,05 liegt. Die kürzere Länge des Nachlaufkerns erklärt, warum die Anströmgeschwindigkeiten vor dem Fahrzeug im Vergleich zu den experimentellen Daten unterschätzt werden (vgl. Tabelle 7-1). Die instationäre Natur des Geschwindigkeitsprofils hängt direkt mit den instationären Geschwindigkeiten in den Randbedingungen zusammen, da sich das Strömungsfeld vom Rand stromabwärts bewegt.

Abbildung 7-10 (unten) zeigt, dass in der Simulation ein leicht negativer Seitenwind – vermutlich auf Grund einer Böe in den für die Randbedingungen verwendeten Messdaten – vorhanden war. Dies geht aus dem Verlauf der v -Komponente im Bereich zwischen 17 m und 49 m hervor. Die räumliche Ausbreitung entspricht dabei etwa 25 % der gesamten simulierten Zeit. Dieser temporäre Seitenwind erklärt

die in Tabelle 7-1 aufgeführten, mittleren negativen Quergeschwindigkeiten. Sie sind darauf zurückzuführen, dass in der Messzeit noch keine vollständige statistisch stationäre Anströmung erreicht werden konnte und dieses Einzelereignis einen deutlichen Einfluss auf die Statistik hat.

Die Ausbreitung des Nachlaufkerns hat einen deutlichen Einfluss auf die Geschwindigkeit in Fahrtrichtung. Der – im Verhältnis zur simulierten Zeit – lang andauernde Seitenwind beeinflusst das mittlere Ergebnis der Quergeschwindigkeit. Dieser Einfluss kann durch längere Simulationen allerdings verringert werden, da eine längere Messzeit die Lösung weiter gegen den statistisch stationären Zustand konvergieren lässt. Abbildung 7-10 und Tabelle 7-1 zeigen jedoch, dass die HF-Randbedingung dennoch eine bessere Abschätzung der Anströmdynamik – insbesondere in der Strömungsschwankung – im Vergleich zur BP-Randbedingung liefert, die keine Quergeschwindigkeiten berücksichtigt.

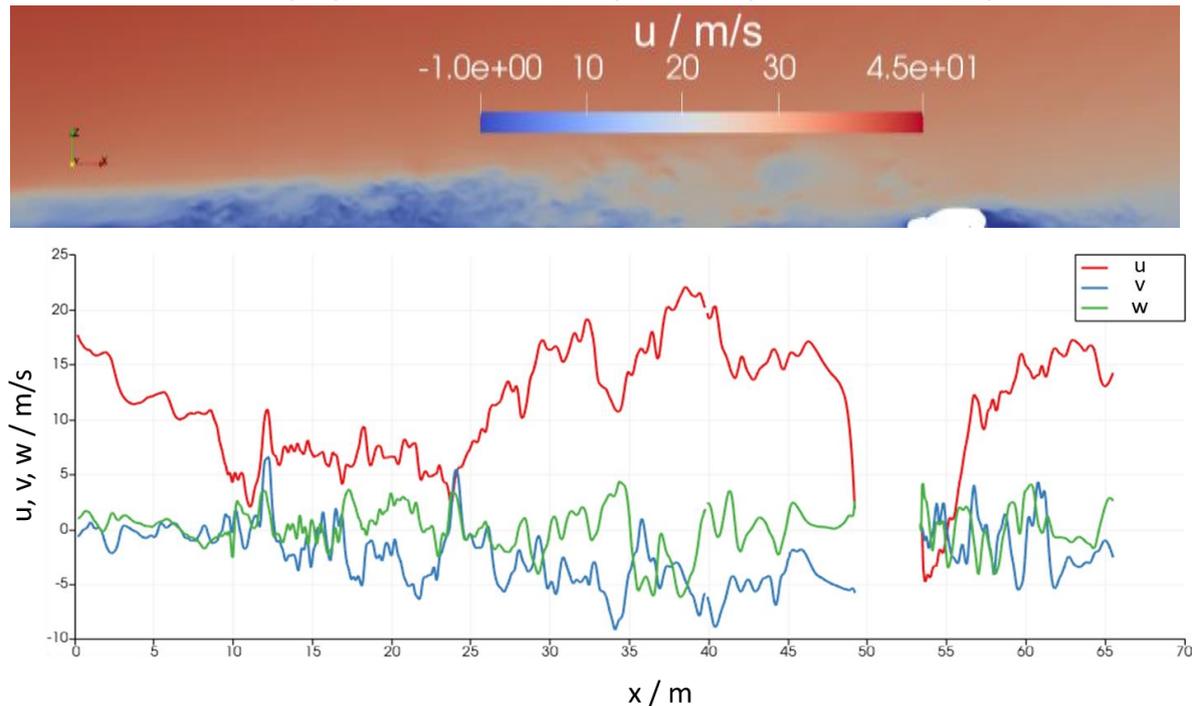


Abbildung 7-10: Oben: Mittlere u-Geschwindigkeitskomponente in der Ebene $y = 0$ m. Unten: Entwicklung der Geschwindigkeitskomponenten entlang der Linie $z = 0,5$ m in der Ebene $y = 0$ m für $t = 2.5$ s.

Neben der Statistik ist auch der zeitliche Verlauf der Strömung von Interesse. Abbildung 7-10 gibt hierzu einen ersten Einblick in die Dynamik der Strömung. Im Folgenden soll näher betrachtet werden, wie gut der zeitliche Verlauf der Versuche auf der Teststrecke in der OpenFOAM-Simulation nachgebildet werden kann. Zunächst werden die mittels OpenFOAM-Simulation berechneten (C - gepunktete Linie) und die gemessenen (M - durchgängige Linie) Geschwindigkeitskomponenten u für die Hinterherfahrt dargestellt. Hierfür sind über den gleichen Zeitraum t die Geschwindigkeiten für die in der Höhe variierten Positionen (0,5 m: grüne Linie; 1,1 m: blaue Linie; 1,3 m: rote Linie) der mittleren Arraysonden ($y = 0$ m) in Abbildung 7-11 aufgetragen. Die Abbildung zeigt, dass die zeitliche Dynamik der Geschwindigkeitskomponente u nachgebildet wird, die Schwankungen jedoch etwas zu niedrig ausfallen. Im betrachteten Bereich liegen die Schwankungen im betrachteten Bereich für die OpenFOAM-Simulation bei etwa 5 m/s, während in der Messung bis zu 7 m/s auftreten. Die Geschwindigkeit wird – wie zuvor schon dargelegt – um bis zu 24% unterschätzt und die kleinskaligen Schwankungen können nicht aufgelöst werden. Die in den Messungen vorhandenen Amplituden in den Schwankungen der Geschwindigkeitskomponente u werden mit der HF-Randbedingung nur bedingt korrekt wiedergegeben.

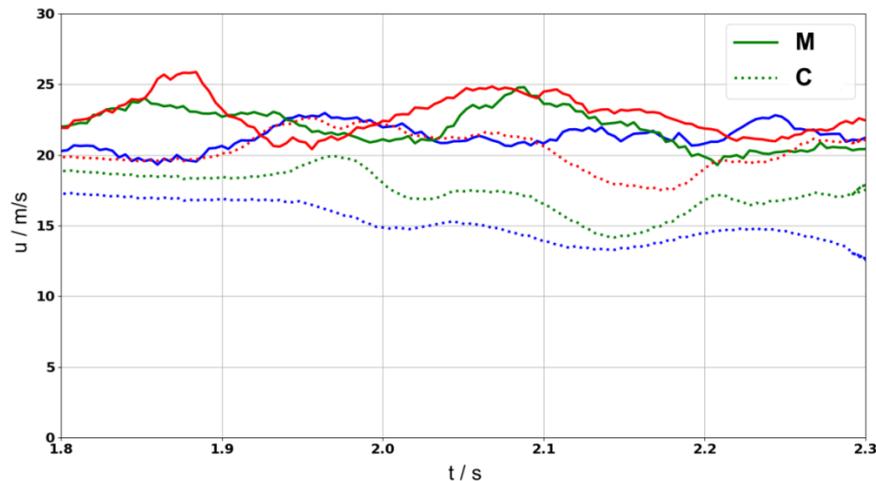


Abbildung 7-11: Instationärer Verlauf der Geschwindigkeitskomponenten u an der mittleren Sonde des Arrays (rote Linie: $z = 1,3$ m, blaue Linie: $z = 0,9$ m, grüne Linie: $z = 0,5$ m).

Neben den zeitlichen Verläufen der Geschwindigkeit u ist auch die Energieverteilung in der Strömung in Fahrtrichtung von Interesse. Mit Hilfe einer spektralen Betrachtung soll ermittelt werden, ob die Energien in der Strömung ähnlich groß sind und in denselben Bereichen auftreten. In Abbildung 7-12 ist daher die spektrale Leistungsdichte der u -Komponente an den 3 mittleren Sonden in unterschiedlichen Höhen für die Messung auf der Teststrecke (M – durchgängige Linien) und die OpenFOAM-Simulation (C – gestrichelte Linien) über einen Frequenzbereich bis 30 Hz aufgetragen. Die Spektren des Fahrversuchs und der OpenFOAM-Simulation sind im Verlauf und ihrer Amplitude zwar nicht identisch, aber ähnlich. So sind sowohl in der Messung als auch in der OpenFOAM-Simulation die größten Energien im niederfrequenten Bereich bei 1 - 3 Hz vorhanden. In der OpenFOAM-Simulation tritt allerdings ein deutlicheres Maximum im Bereich von 1,5 Hz auf, während sich bei den Messungen die Energien bis 3 Hz nur geringfügig verändern. Bei höheren Frequenzen tritt ein typischer Abfall der Energien in der Strömung in Fahrtrichtung auf. Vom Spektrum für die Geschwindigkeiten in 1,3 m Höhe abgesehen, sind die in der OpenFOAM-Simulation vorhergesagten spektralen Energieanteile niedriger als in der Messung.

Die in Abbildung 7-12 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die spektrale Energie für die Strömungskomponente u in den OpenFOAM-Simulationen niedriger ausfällt als in den Messungen. Die spektrale Verteilung der Energien ist jedoch ähnlich.

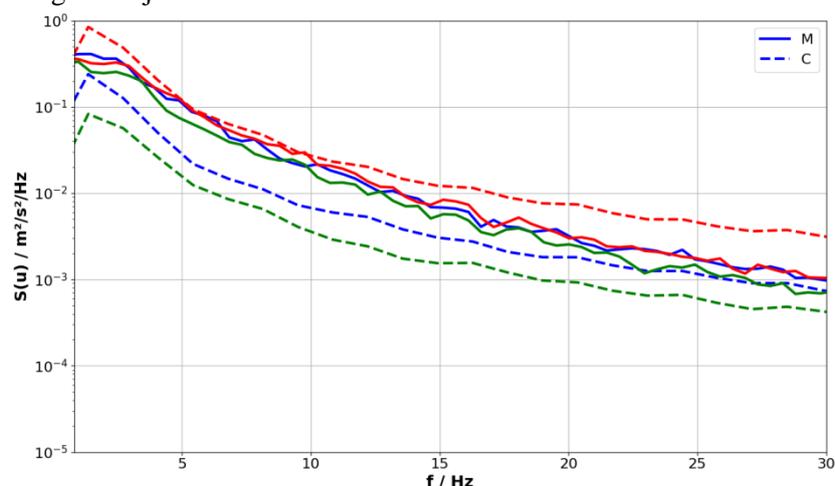


Abbildung 7-12: Spektren der Geschwindigkeitskomponente u für die mittleren Sonden in 0,5 m Höhe (blau), 1,1 m Höhe (grün), und 1,7 m Höhe (rot).

Die Ergebnisse aus den Versuchsfahrten haben gezeigt, dass neben der Geschwindigkeitskomponente u insbesondere auch die Quergeschwindigkeit v während der Hinterherfahrt deutlich beeinflusst wird. Daher erfolgt analog zur vorherigen Betrachtung für die Geschwindigkeitskomponente u eine Betrachtung der Quergeschwindigkeit v , sowohl über die Zeit als auch für die Verteilung der Energien im Spektrum. Es soll auch für die Quergeschwindigkeit festgestellt werden, wie gut diese in den OpenFOAM-Simulationen im Vergleich zu den Versuchsfahrten auf der Teststrecke nachgebildet werden kann.

Abbildung 7-13 zeigt die Entwicklung der Geschwindigkeitskomponente v über die Zeit an den mittleren Sondenpositionen ($y = 0$ m) für den Versuch auf der Teststrecke (M) und die OpenFOAM-Simulation (C). Die Geschwindigkeiten stimmen zwar nicht exakt überein, zeigen jedoch im zeitlichen Verlauf ein ähnliches Verhalten. Der Schwankungsbereich liegt bei etwa 5 m/s. Die niederfrequenten Komponenten der Messung und der OpenFOAM-Simulation stimmen gut überein, wobei die OpenFOAM-Simulation das in den Messungen beobachtete Verhalten der kleinskaligen Schwankungen nicht vorherzusagen kann. Insgesamt lässt sich jedoch festhalten, dass die OpenFOAM-Simulation die in den Messungen beobachteten Schwankungen gut abbildet.

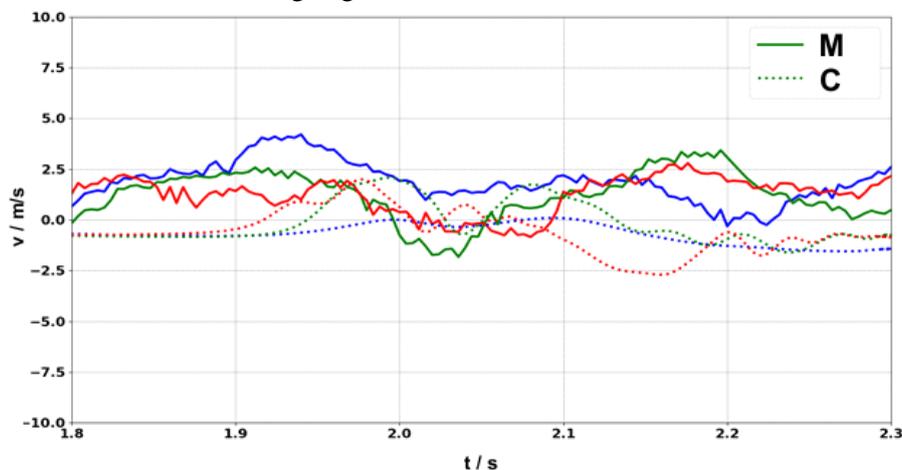


Abbildung 7-13: Instationärer Verlauf der Geschwindigkeitskomponente v an den mittleren Sonden des Fahrzeugarrays. Anmerkung: blaue Linie: $z = 0,5$ m, grüne Linie: $z = 0,9$ m, rote Linie: $z = 1,3$ m.

Auch für die Quergeschwindigkeit ist die spektrale Verteilung von Interesse. In den Messungen konnte für diese Komponente gezeigt werden, dass eine dominierende Frequenz bei 2,5 Hz auftritt (siehe Kapitel 5.2.1). Im Folgenden soll untersucht werden, ob die spektrale Energieverteilung der Geschwindigkeitskomponente in Querrichtung von den OpenFOAM-Simulationen in Übereinstimmung mit den gemessenen Werten vorhergesagt werden. Abbildung 7-14 zeigt daher das zugehörige Spektrum für die Quergeschwindigkeit aus den Messungen (M) und den OpenFOAM-Simulationen (C) für die mittleren Sonden in unterschiedlichen Höhen. Die spektrale Verteilung der Energie für die Geschwindigkeitskomponente v unterscheidet sich nur leicht, wenn man die Messergebnisse mit den Ergebnissen der OpenFOAM-Simulationen vergleicht. Auch das Maximum bei 2,5 Hz kann von der OpenFOAM-Simulation abgebildet werden. Lediglich der Wert der OpenFOAM-Simulation in 1,3 m Höhe zeigt deutliche Abweichungen von den Messergebnissen. Die Energien sind hier zu niedrig. Eine mögliche Erklärung für diese Abweichung könnte eine Interaktion des berechneten Nachlaufes mit der freien Anströmung sein, die hier eventuell etwas zu dicht am Fahrzeug liegt.

Insgesamt wird die Quergeschwindigkeit in den OpenFOAM-Simulationen jedoch gut nachgebildet. Sie weist ähnliche Schwankungen auf, bildet das Spektrum der Messergebnisse gut nach und zeigt dort auch die dominante Frequenz von 2,5 Hz.

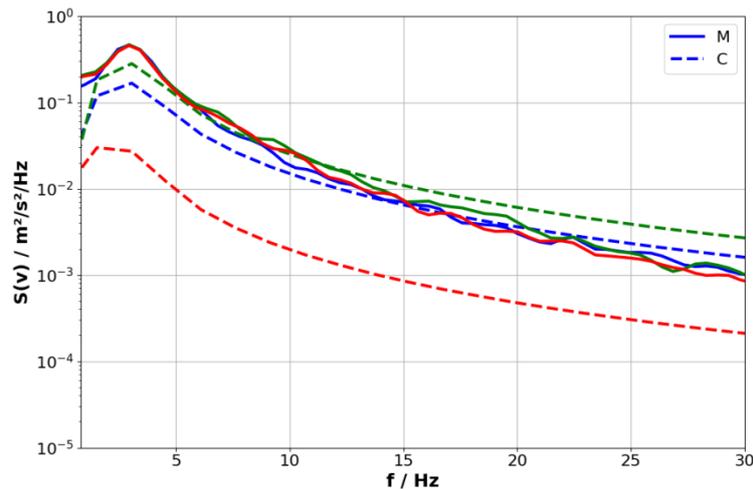


Abbildung 7-14: Spektren der Geschwindigkeitskomponente v für die mittleren Sonden in 0,5 m Höhe (blau), 0,9 m Höhe (grün) und 1,3 m Höhe (rot).

Wie in Tabelle 7-1 zu sehen, hat die in der Einströmung vorgegebene Turbulenzintensität einen Einfluss auf die mittlere Geschwindigkeitskomponente und deren Standardabweichung vor dem Fahrzeug. Im Folgenden wird der vertikale Verlauf Turbulenzintensität betrachtet, da sie offensichtlich einen Einfluss auf die Anströmbedingungen und folglich auch auf die Umströmung des Fahrzeugs und die auftretenden Kräfte hat.

Abbildung 7-15 zeigt daher einen Vergleich der vertikalen Profile der Turbulenzintensitäten Tu_x . Die CFD-Ergebnisse (C – gestrichelte Linie) und die Ergebnisse aus dem Fahrversuch (M - Kreise) sind für die Sondenpositionen in der Fahrzeugmitte bei $y = 0$ m und 0,5 m vor der Fahrzeugnase angegeben. Die Höhe der Messposition wurde dabei für die OpenFOAM-Simulation zwischen 0 m und 2 m variiert. Die Turbulenzintensitäten aus den OpenFOAM-Simulationen sind im bodennahen Bereich niedriger als die gemessenen Werte. Die verwendete Rekonstruktionsmethode kann diese kleinen Skalen – wie in Abbildung 7-9 gezeigt – nicht im Geschwindigkeitsfeld erzeugen. Zusammen mit Dissipationseffekten führt dies vermutlich zu den unterschätzten Turbulenzintensitäten im Bodenbereich bis zu 1 m Höhe. Ab einer Höhe von 1 m nimmt die Turbulenzintensität deutlich zu und stimmt gut mit den Ergebnissen der Fahrversuche überein.

Aus den CFD-Ergebnissen lässt sich ableiten, dass die Turbulenzintensität über die Höhe gut vorhergesagt wird, es jedoch zu Abweichungen in Bodennähe kommt.

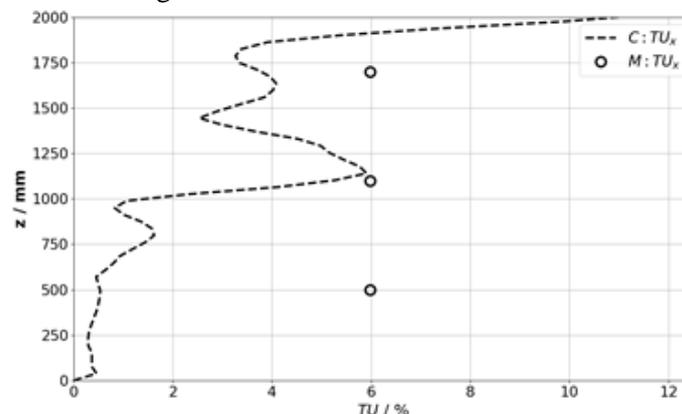


Abbildung 7-15: Tu_x entlang $y = 0$ m in vertikaler Richtung für die OpenFOAM-Simulation (C – gestrichelte Linie) und die Hinterherfahrt auf der Teststrecke (M – Kreise) für die Arraysonden.

Um die Abweichungen der Turbulenzintensitäten in Bodennähe besser verstehen zu können, werden die Wirbelstärken in unterschiedlichen Höhen genauer betrachtet. Abbildung 7-15 zeigt eine Momentaufnahme der Wirbelstärken bei $z = 0,2$ m (oben) und $z = 1,3$ m (unten). Wie bereits in Abbildung 7-10 und Tabelle 7-1 gezeigt, wird die Strömung nach der Entwicklung des Wirbelkerns auf Grund eines leichten Seitenwindes geringfügig in die negative y -Richtung gelenkt. Die Nachläufe des vorherfahrenden Fahrzeugs und des folgenden Fahrzeugs vermischen sich etwa 4 - 5 Fahrzeuglängen hinter dem hinterherfahrenden Fahrzeug. Die Unterschiede in den Wirbelstärken zwischen den beiden z -Schnitten sind ein Hinweis auf die unterschiedliche Strömungsdynamik dieser beiden Regionen. Die Ebene bei $z = 0,2$ m befindet sich direkt in der bodennahen Nachlaufströmung und weist geringere Wirbelstärken auf als die Ebene bei $z = 1,3$ m. Die Ebene bei $z = 1,3$ m liegt im Grenzbereich zwischen der bodennahen Nachlaufströmung und der freien Strömung. Dieser Grenzbereich weist wesentlich energiereichere Wirbel auf als der bodennahe Nachlaufbereich bei $z = 0,2$ m (siehe hierzu auch die erhöhte Turbulenzintensität bei $z = 1,3$ m in Abbildung 7-15). Die durchschnittliche Wirbelstärke ist in Bodennähe also deutlich geringer als im Übergangsbereich zur freien Strömung, da die turbulente Dissipation im Nachlauf höher ist. Die energiehaltigen Längenskalen sind im bodennahen Nachlauf demzufolge kleiner als im Freistrom.

Mit Hilfe der Wirbelstärken kann gezeigt werden, dass die Abweichungen der Turbulenzintensität in Bodennähe auf kleinere Strukturen mit größeren Dissipationen zurückzuführen sind.

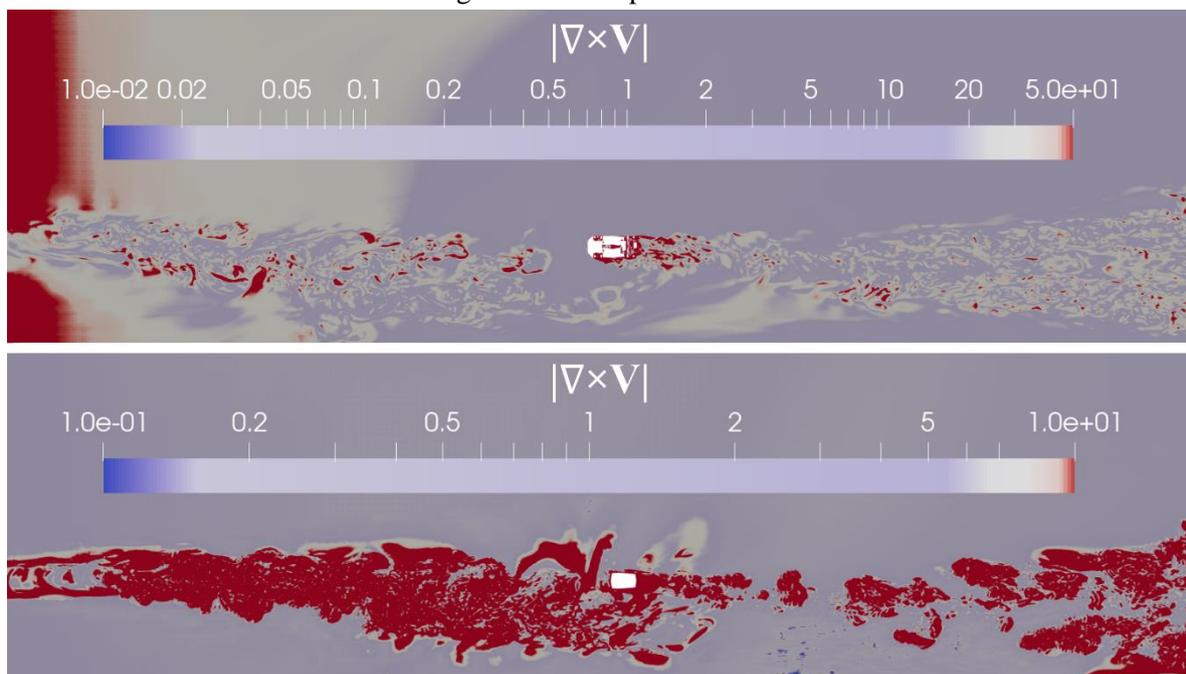


Abbildung 7-16: Vergleich der Wirbelstärken in 2 Höhen (oben: $z = 0,2$ m, unten: $z = 1,3$ m bei $t = 2,43$ s).

Großskalige Strömungseigenschaften und integrale Kraftbeiwerte

In den vorherigen Abschnitten wurde gezeigt, dass mit der HF-Randbedingung wesentliche Eigenschaften (Turbulenzintensitäten, Geschwindigkeitskomponenten- und Schwankungen) der Anströmbedingungen der Hinterherfahrt angenähert werden können und dass instationäre Strömungsstrukturen durch die HF-Randbedingungen erzeugt werden. Im Folgenden soll untersucht werden, welche Auswirkung die veränderten Anströmbedingungen auf das Fahrzeug haben. Dazu werden die Druckverteilungen sowie die Kraftbeiwerte für die instationären Anströmbedingungen bei der HF-Randbedingung und der BP-Randbedingung betrachtet. Die BP-Randbedingung hat eine Turbulenzintensität von 6 %, während die HF-Randbedingung Turbulenzintensitäten von 2 %, 6 %, und 10 % beinhaltet/vorgibt. Insbesondere die Auswirkung auf die Kräfte ist von großem Interesse, da die Anströmbedingungen und Druckbeiwerte

auf der Teststrecke zwar gemessen werden können, es allerdings keine direkte Information über die auftretenden Kräfte gibt. Mit Hilfe einer genauen OpenFOAM-Simulation könnten also gute Vorhersagen in Bezug auf die auftretenden Kräfte am Fahrzeug und mögliche Maßnahmen zur Verbesserung der Fahrzeugaerodynamik gemacht werden.

Zunächst soll untersucht werden, wie sich die veränderte Anströmung global auf das Fahrzeug auswirkt. Dazu werden die Widerstandsbeiwerte sowie deren Standardabweichung herangezogen (siehe Tabelle 7-2). Die Ergebnisse für die HF-Randbedingung sind für die Turbulenzintensitäten $Tu_x = 2\%$, 6% und 10% angegeben. Zusätzlich ist zum Vergleich die Randbedingung mit Blockprofil (BP) aufgeführt. Das zur Berechnung der Kraft verwendete integrierte Druckfeld an der Fahrzeugoberfläche wird dabei über den dynamischen Druck in der freien Anströmung berechnet. Mit steigender Turbulenzintensität ist zu erwarten, dass auch der Widerstandsbeiwert ansteigt. Bei einer Steigerung der Turbulenzintensität von 2% auf 6% für den Fall der Hinterherfahrt tritt auch eine Steigerung des Widerstandsbeiwerts von $0,029$ auf. Eine weitere Erhöhung von Tu_x auf 10% führt jedoch nur zu einem geringeren Anstieg des Widerstandsbeiwerts von $0,010$ im Vergleich zu dem Fall mit $Tu_x = 2\%$. Die Abnahme des Widerstandsbeiwerts mit zunehmender Turbulenzintensität lässt sich nicht mit einer Druckrückkopplung zum Randbereich erklären, da der Abstand zum vorausfahrenden Fahrzeug 50 m beträgt. Das entspricht ca. 10 Fahrzeuglängen und sollte höchstens zu sehr schwachen Druckrückkopplungen führen. Die Abnahme des Widerstandsbeiwerts bei einer – von 6% auf 10% – erhöhten Turbulenzintensität ist daher unerwartet. Für die Auswertung der BP-Randbedingung sei zunächst angemerkt, dass der Widerstandsbeiwert in den 1:1-Windkanalmessungen mit einer Turbulenzintensität von $0,3\%$ und ansonsten gleichen Anströmbedingungen bei $0,283$ liegt und somit nahezu identisch mit dem Ergebnis von $0,286$ für die Simulation mit BP-Randbedingung ist. Die Ergebnisse aus den OpenFOAM-Simulationen deuten darauf hin, dass der Widerstandsbeiwert unter anderem von der Turbulenzintensität Tu_x abhängt. Das Auflösen der Strukturen und die Variation von Tu_x haben demzufolge einen Einfluss auf den Widerstandsbeiwert. Die BP-Randbedingung mit isotroper Turbulenzverteilung und keinen Strömungsstrukturen im Einlass weist hingegen nur einen geringen Unterschied zu den Windkanalmessungen mit niedriger Turbulenzintensität auf.

Die berechnete Standardabweichung des Widerstandsbeiwerts für die BP-Randbedingung ist wesentlich geringer als für die HF-Randbedingung. Die Schwankung wird im Fall der BP-Randbedingung primär durch das vom Fahrzeug erzeugte Strömungsfeld bestimmt. Im Gegensatz hierzu bildet die HF-Randbedingung einen wesentlichen Anteil der instationären Strukturen in der Strömung nach, die im Fahrversuch auftraten. Die Schwankung des Widerstandsbeiwerts wird demnach durch die Strukturen in den Anströmbedingungen beeinflusst. Zwischen den unterschiedlichen Turbulenzintensitäten der HF-Randbedingung sind die Unterschiede in den Druckschwankungen jedoch gering.

Die Änderungen des Widerstandsbeiwerts auf Grund von unterschiedlichen Turbulenzintensitäten können also mit einer strukturauflösenden Randbedingung und einem strukturauflösenden Turbulenzmodell sowie einem gut gestalteten Netz aufgelöst werden. Die Ergebnisse zeigen, dass die instationäre Randbedingung einen Einfluss auf den Widerstandsbeiwert hat. Der Zusammenhang zwischen dem Widerstandsbeiwert und der Turbulenzintensität der Strömung ist jedoch mit den vorliegenden Daten nicht direkt nachvollziehbar.

Tabelle 7-2: Vergleich der berechneten Widerstandsbeiwerte für unterschiedliche Randbedingungen und Turbulenzintensitäten Tu_x . c_w : Mittelwert, δ : Standardabweichung $c_{w,rms}$ -Wert, t : berechnete physikalische Zeit.

Randbedingung	$Tu_x / \%$	c_w	$c_{w,rms}$
BP	6	0,286	0,025
HF	2	0,260	0,13
HF	6	0,289	0,14
HF	10	0,270	0,14

Um die lokalen Einflüsse der instationären Anströmung besser zu verstehen, werden im nächsten Abschnitt die Druckverteilungen und die Druckschwankungen an der Fahrzeugfront, der Motorhaube und am Dach diskutiert. Die Ergebnisse stammen aus den OpenFOAM-Simulationen mit unterschiedlichen Anströmbedingungen sowie aus den Messergebnissen der Versuchsfahrten auf der Teststrecke. Von besonderem Interesse ist dabei, wie stark sich die unterschiedlichen Anströmbedingungen, insbesondere die unterschiedlichen Turbulenzintensitäten, auf die Drücke am Fahrzeug auswirken.

In Abbildung 7-17 sind die Oberflächendruckbeiwerte c_p (links) und deren Schwankungen $c_{p,rms}$ (rechts) über die Breite x dargestellt. Die gezeigten Ergebnisse wurden über die Breite an der vorderen Stoßstange gemessen. Die Abbildung zeigt die Ergebnisse für die Hinterherfahrt auf der Teststrecke (M: blaue Punkte) und für die OpenFOAM-Simulationen (C) mit HF-Randbedingung bei unterschiedlichen Turbulenzintensitäten (2 %: blaue Linie, 6 %: grüne Linie, 10 %: lila Linie) sowie für die Randbedingung BP (rote Linie). Es wird eine gute Übereinstimmung zwischen den Messwerten und den Ergebnissen der OpenFOAM-Simulation mit der BP-Randbedingung erreicht. Die Verteilung des Druckverlaufs – symmetrisch über die Mitte – wird von diesem Fall gut simuliert. Auch die HF-Randbedingungen weisen eine hohe Übereinstimmung mit den Messergebnissen für die Druckbeiwerte auf. Die Druckverteilung zeigt zwischen der linken und rechten Fahrzeugseite allerdings eine geringfügige Asymmetrie. Diese Asymmetrie wird vermutlich durch den temporär auftretenden Seitenwind verursacht. Diese Asymmetrie wird insbesondere bei $Tu_x = 2 \%$ deutlich und führt auf der rechten Fahrzeugseite zu höheren Druckbeiwerten im Vergleich zu den Messungen auf der Teststrecke. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Turbulenzintensitäten einen erheblichen Einfluss auf die Druckverteilung haben können. Die korrekte Simulation der Turbulenzintensität scheint also die Genauigkeit der CFD-Ergebnisse für die Drücke zu verbessern.

Im rechten Teil von Abbildung 7-17 sind – analog zu der zuvor diskutierten Druckverteilung – die Standardabweichungen $c_{p,rms}$ der Drücke in Querrichtung y dargestellt. Sowohl die Messergebnisse als auch die OpenFOAM-Simulationen für die BP- und HF-Randbedingungen mit $Tu_x = 6\%$ liegen für $c_{p,rms}$ in derselben Größenordnung. Die $c_{p,rms}$ -Werte der BP-Randbedingung liegen etwas über den im Fahrversuch ermittelten Werten. Die Ergebnisse für die HF-Randbedingung bei 6 % zeigen in der Fahrzeugmitte und am rechten Rand leichte Abweichungen von den Messergebnissen, geben diese aber ansonsten gut wieder. Die OpenFOAM-Simulationen bei einer Turbulenzintensität von 2 % und 10 % weichen deutlich von den Messergebnissen ab. Für die Standardabweichung des Drucks zeigt sich eine Zunahme der Schwankungsgröße mit zunehmender Turbulenzintensität bei gleicher Randbedingung (HF-Randbedingung bei 2 % - 10 %). Dies entspricht der Erwartung, da höhere Turbulenzintensitäten größere Schwankungen in der Anströmung bedeuten und diese folglich zu größeren Schwankungen im Druck führen.

Man kann also festhalten, dass die korrekte Simulation der Turbulenzintensität einen deutlichen Einfluss auf die Druckverteilung und die Druckschwankungen hat. Die gezeigten Asymmetrien in der Druckverteilung spiegeln wahrscheinlich noch Effekte von einmaligen Ereignissen in der Strömung wider. Es werden also noch längere Messzeiten benötigt, um einen vollständig statistisch stationären Druckbeiwert über die gesamte Fahrzeugfront zu generieren. Dennoch wird bereits eine gute Übereinstimmung in der Druckverteilung erreicht. Die Druckabweichungen gegenüber den Messungen auf der Teststrecke – insbesondere zu den Seiten des Fahrzeugs – zeigen, dass der Randbereich besonders empfindlich auf die geänderten Anströmbedingungen reagiert.

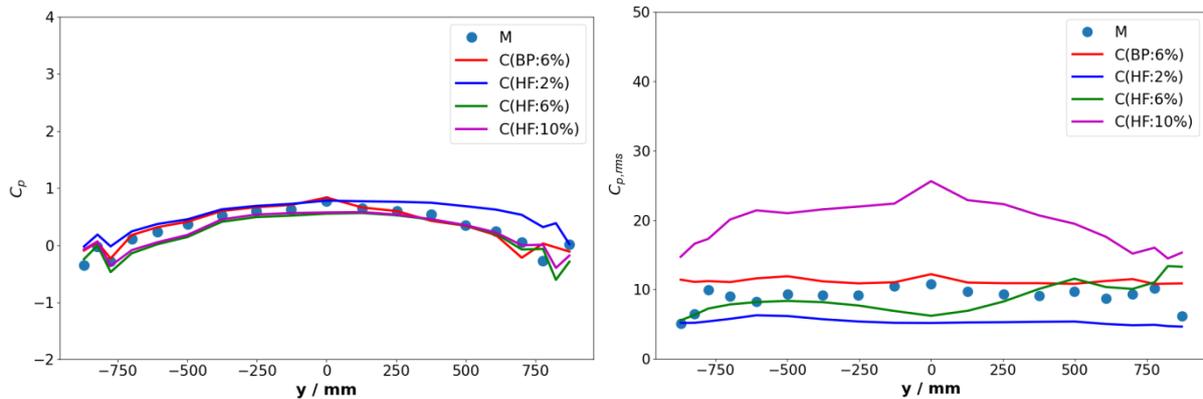


Abbildung 7-17: Verteilung der Druckbeiwerte c_p (links) und der Schwankung des Druckbeiwerts $c_{p,rms}$ (rechts) entlang der Fahrzeugfront für die Messung (M – blaue Punkte) auf der Teststrecke, die BP- (blaue Linie) und HF-Randbedingungen ($Tu_x = 2\%$: rote Linie, $Tu_x = 6\%$: grüne Linie, $Tu_x = 10\%$: lila Linie).

Neben der Front des Fahrzeugs befinden sich auch Teile der Fahrzeugoberseite in der instationären Anströmung. Die veränderten Anströmbedingungen können somit auch die Druckverteilungen an der Motorhaube oder am Dach beeinflussen.

In Abbildung 7-18 ist die Oberflächendruckverteilung (links) und die Druckschwankung (rechts) über die x-Koordinate der Druckmessstellen aufgetragen. Der Druck wurde entlang der Motorhaube und des Daches gemessen. In Querrichtung y waren die Druckmessstellen mittig entlang $y = 0$ m angeordnet. Die Messergebnisse von der Teststrecke sind als blaue Punkte dargestellt, die Ergebnisse der OpenFOAM-Simulationen als Linien. Die blaue Linie entspricht dabei den Ergebnissen mit der BP-Randbedingung, die rote Linie der HF-Randbedingung mit $Tu_x = 2\%$. Die HF-Randbedingung mit $Tu_x = 6\%$ ist in grün dargestellt und die HF-Randbedingung mit $Tu_x = 10\%$ in lila.

Für die Oberflächendruckverteilung ergibt sich eine gute Übereinstimmung der in den Messungen auf der Teststrecke ermittelten c_p -Werte und den OpenFOAM-Simulationen mit der HF-Randbedingung. Insbesondere im Heckbereich zeigt sich dabei, dass eine abnehmende Turbulenzintensität bei den Simulationen mit der HF-Randbedingung zu höheren Druckbeiwerten führt. Die größten Übereinstimmungen mit den Messergebnissen werden dabei bei einer Turbulenzintensität von 6% erzielt. Die Vorhersagen der OpenFOAM-Simulation mit der BP-Randbedingung stimmen im Bereich des Daches gut mit den Messergebnissen überein. Allerdings werden im vorderen Bereich geringere als im Fahrversuch vorhergesagt. Der schnelle Übergang von der Druckabnahme zur Druckrückgewinnung an der Motorhaube bei $x = -800$ mm wird dabei von der BP-Randbedingung etwas besser aufgelöst als von den HF-Randbedingungen, die einen etwas kontinuierlicheren Übergang zeigen. Dies deutet darauf hin, dass bei der HF-Randbedingung die Strukturen innerhalb der Anströmung stärker vermischt werden, was in Folge zu einer glatteren Oberflächendruckverteilung über die Fahrzeugfront führt.

Die Verläufe der Druckschwankungen (Abbildung 7-18, rechts) aus den OpenFOAM-Simulationen stimmen an der Motorhaube qualitativ mit den Ergebnissen der Messung überein, weisen aber quantitativ teils deutliche Unterschiede auf. Die instationären Anströmungen der HF-Randbedingungen mit $Tu_x = 2\%$ und 6% stimmen in diesem Bereich gut mit den Messergebnissen überein, während die Turbulenzintensität von 10% zu deutlich höheren Schwankungen führt. Dies ist durch die höheren Schwankungen in der Anströmung zu erklären. Die Ergebnisse im Fall der BP-Randbedingung weisen im Vergleich mit der Messung zu hohe Druckschwankungen auf. Aber auch gegenüber der HF-Randbedingung bei gleicher Turbulenzintensität von 6% tritt eine höhere Druckschwankung auf. In diesem Bereich spielt neben der Turbulenzintensität also auch die Struktur der Strömung eine wichtige Rolle, wenn es darum geht, die Druckschwankungen korrekt zu simulieren. Am Heck zeigen die Ergebnisse von den OpenFOAM-Simulationen Abweichungen von den Messergebnissen zu erkennen. Die Querströmung wirkt sich in der Simulation deutlich auf die Grenzschicht am Dach aus und verursacht hier gelegentlich kleine, lokale Ablösungen, die die Druckschwankungen erhöhen.

Auch für die Druckverteilung an der Motorhaube und am Dach zeigen die OpenFOAM-Simulationen also einen Einfluss der instationären Anströmbedingungen (HF-Randbedingung) gegenüber einer gleichförmigen Anströmung (BP-Randbedingung). Mit den instationären Anströmbedingungen (HF-Randbedingung) liegt die Druckverteilung dichter an den experimentellen Werten, jedoch zeigt sich auch hier, dass dabei die korrekte Wahl der Turbulenzintensität wichtig ist. Die Abhängigkeit von der Turbulenzintensität wird bei den Druckschwankungen noch deutlicher. Insbesondere Turbulenzintensitäten von 10% führen zu hohen Druckschwankungen.

Betrachtet man die in Abbildung 7-17 und Abbildung 7-18 dargestellten Ergebnisse zusammen, so zeigt sich, dass die Turbulenzintensität einen Einfluss auf die Druckverteilung und die Schwankung der Drücke hat. Dabei wird deutlich, dass der Einfluss der Turbulenzintensität sich unterschiedlich stark an den verschiedenen Stellen des Fahrzeugs auswirkt. So ist die Auswirkung der Turbulenzintensität auf $c_{p,rms}$ an der Fahrzeugfront stärker als auf die Motorhaube oder das Dach. Des Weiteren ist anhand der Druckverläufe zu erkennen, dass sich einmalige Effekte insbesondere auf die Ergebnisse für Bereiche, die direkt angeströmt werden, – wie die vordere Stoßstange – auszuwirken scheinen. Dies äußert sich darin, dass für diese Bereiche mehr Messzeit als für andere Bereiche benötigt wird, bis die Ergebnisse statistisch stationär sind, da eine Änderung in der Strömung dort zu einer größeren Änderung im Druck als in den weniger empfindlichen Bereichen führt.

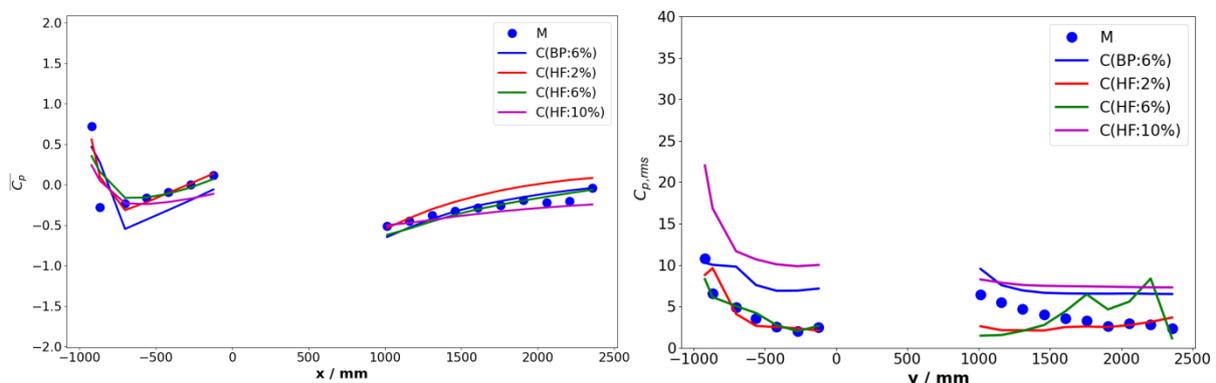


Abbildung 7-18: Verteilung der Druckbeiwerte c_p (links) und der Schwankung des Druckbeiwerts $c_{p,rms}$ (rechts) entlang der Symmetrieachse des Fahrzeugs an der Motorhaube und entlang des Daches für die Messung (M – blaue Punkte) auf der Teststrecke, die BP- (blaue Linie) und HF-Randbedingungen ($Tu_x = 2\%$: rote Linie, $Tu_x = 6\%$: grüne Linie, $Tu_x = 10\%$: lila Linie).

Bewertung der HF-Randbedingung

Der zur Erzeugung der HF-Randbedingung vorgeschlagene Ansatz basiert auf einer gitterlosen Rekonstruktionsmethode, mit der das Geschwindigkeitsfeld aus den Hinterherfahrten auf der Teststrecke mit Hilfe einer diskreten Menge an Messpunkten simuliert wird. Diese Methode benötigt also aus Versuchen ermittelte Anströmbedingungen, um das Strömungsfeld berechnen zu können. Durch die Verwendung der – in den Versuchen auf der Teststrecke – ermittelten Anströmbedingungen bei der Hinterherfahrt werden neben den instationären Eigenschaften der Anströmung auch die reduzierte mittlere Geschwindigkeit im Nachlaufbereich des Fahrzeugs berücksichtigt. Dies könnte bei den Windkanalversuchen nicht direkt berücksichtigt werden. Des Weiteren kann die Turbulenzintensität durch eine Skalierung der Geschwindigkeitsschwankungen in die unterschiedlichen Raumrichtungen einfach variiert werden. Diese Variation war weder in den Fahrversuchen noch in den Windkanalmessungen in diesen Größenordnungen möglich. Die verwendeten HF-Randbedingungen können mindestens qualitativ, häufig auch quantitativ, viele der in den Fahrversuchen beobachteten Strömungsbedingungen nachbilden. So bleiben die in den Versuchen ermittelten Hauptfrequenzen und die Dynamik der Strömung erhalten. Die Oberflächendrücke liegen in ihren Verläufen nahe an den in den Experimenten ermittelten Verläufen. Allerdings wird die mittlere Geschwindigkeitskomponente u im Vergleich zu den experimentellen Ergebnissen um etwa 15 % unterschätzt. Die Widerstandsbeiwerte scheinen dennoch – unter Berücksichtigung der simulierten Anströmgeschwindigkeit – plausibel.

Es ist wichtig, einen ausreichend langen Zeitabschnitt zu simulieren, um statistisch stationäre Ergebnisse zu erzielen; der Einfluss von lokalen Druckfeldern auf die mittleren Ergebnisse wird also reduziert. Es können mit der gewählten Simulationsmethode nicht alle Längenskalen im Strömungsfeld simuliert werden, was insbesondere Abweichungen der Turbulenzintensität in Bodennähe zur Folge hat. Dies liegt am Auflösungsvermögen von 50 mm für die Rekonstruktionsmethode des Geschwindigkeitsfelds.

Durch die Variation der Turbulenzintensitäten kann ein Anstieg des Widerstandsbeiwerts bei einer ersten Erhöhung von $Tu_x = 2\%$ auf 6 % festgestellt werden. Eine weitere Erhöhung der Turbulenzintensität führt jedoch nicht zu einem weiteren Anstieg des Widerstandsbeiwerts gegenüber der Turbulenzintensität von 6 %, sondern nur zu einem geringen Anstieg gegenüber einer Turbulenzintensität von 2 %. Es ist kein konsistenter Trend zu erkennen, mit dem der Widerstand in Beziehung zur Turbulenzintensität gesetzt werden kann. Die Analyse der Oberflächendrücke und der Druckschwankungen zeigt, dass die korrekte Nachbildung der Turbulenzintensität und der in der Strömung enthaltenen Strukturen die Ergebnisse der OpenFOAM-Simulationen im Vergleich mit der Messung auf der Teststrecke deutlich verbessert.

Die entwickelte HF-Randbedingung ermöglicht die Erzeugung einer Anströmung in einer OpenFOAM-Simulation gemäß gemessener Werte und die Variation des Turbulenzgrades der Anströmung. Es ist jedoch zu beachten, dass für statistisch stationäre Vorgänge zur Ermittlung mittlerer Größen ein genügend langer Zeitabschnitt simuliert werden muss, wenn es sich um instationäre Anströmungen handelt.

7.2.2 OpenFOAM-Simulation der Strömung im SWG mit Klappensystem

Im SWG wurden Windkanalmessungen mit einem Klappensystem und einem maßstabsgetreuen 1:4-Modell des in den Fahrversuchen verwendeten Fahrzeugs durchgeführt. Es konnte experimentell gezeigt werden, dass die Nachbildung der Hinterherfahrt im Windkanal gute Übereinstimmung mit den Fahrversuchen liefert. Die Flaps wurden unter anderem bei einer Frequenz von 10 Hz und mit einer Amplitude von 10° sinusförmig bewegt, um die statistisch stationären Zustände der Hinterherfahrten auf der Teststrecke zu erreichen. Andere Bewegungsformen für die Flaps sind jedoch ebenfalls denkbar und wurden experimentell auch untersucht. Im Folgenden soll die OpenFOAM-Simulation des Klappensystems als alternative Methode betrachtet werden, um die Anströmbedingungen im Windkanal für

unterschiedliche Fahrmanöver nachzubilden. Der Vorteil der Simulation des Windkanals besteht darin, dass die Randbedingungen sehr definiert vorgegeben sind. Mit den Randbedingungen des Windkanals und der Klappen könnten die Simulationen zukünftig als eine Möglichkeit zum Abgleich mit den bzw. zur Vorbereitung der Messungen im Windkanal dienen. Gleichzeitig erlauben die OpenFOAM-Simulationen im Gegensatz zu den Messungen auf der Teststrecke einen Einblick in das gesamte Strömungsfeld und die Ermittlung der Kräfte, die auf das Fahrzeug wirken. Es soll daher im Folgenden untersucht werden, wie gut die Windkanalbedingungen mit aktivem Klappensystem mit OpenFOAM-Simulationen dargestellt werden können.

Strömungsfeld

Zunächst soll untersucht werden, ob das während der Windkanalmessungen auftretende Strömungsfeld durch die OpenFOAM-Simulation für den Anregungsfall mit einer sinusförmigen Flapbewegung bei 10 Hz und 10° Ausschlag nachgebildet werden kann. Hierzu werden zunächst die mittleren Strömungsfelder und danach die instationären Geschwindigkeitsverläufe der OpenFOAM-Simulationen mit den entsprechenden Verläufen der Windkanaluntersuchungen verglichen.

In Tabelle 7-3 sind die Mittelwerte (links) und Standardabweichungen (rechts) der Geschwindigkeitskomponenten (u: oben, v: mittig, w: unten) unter einer sinusförmiger Klappenbewegung zur Strömungsanregung dargestellt. Es werden die gemittelten Ergebnisse aus den Messungen (M) im Windkanal und aus der OpenFOAM-Simulation (C) verglichen. Die dargestellten Ergebnisse werden ermittelt, indem zunächst an den einzelnen Sondenpositionen des Arrays (siehe Kapitel 6.3.3) eine zeitliche Mittelung für die jeweilige Geschwindigkeitskomponente durchgeführt wird. Diese Ergebnisse werden dann nochmals über alle Sonden gemittelt. Die Ergebnisse der OpenFOAM-Simulationen stimmen gut mit den Ergebnissen aus den Messungen überein. Die u-Komponente hat mit 1,3 % (0,4 m/s) die größte Abweichung gegenüber der Geschwindigkeit aus den Versuchen. Die anderen Strömungskomponenten weisen eine Abweichung von lediglich 0,6 % gegenüber der mittleren Anströmgeschwindigkeit auf. Die Standardabweichungen der Geschwindigkeitskomponenten v und w sind für die Versuche und die Simulation nahezu identisch, während die u-Komponente in der Simulation eine etwas größere Schwankungsbreite von 6 % gegenüber der Anströmgeschwindigkeit aufweist. Der Trend, dass die u-Komponente die größten Abweichungen zeigt, war auch für die HF-Randbedingung (siehe Kapitel 7.2.1) erkennbar, jedoch werden die mittleren Geschwindigkeiten in den Windkanalsimulationen deutlich besser vorhergesagt als das für die HF-Randbedingung der Fall war. Der Grund hierfür ist vermutlich, dass die Randbedingungen für den Windkanal besser bekannt und definiert sind und dass die Ergebnisse für die Geschwindigkeiten schneller auf statistisch stationäre Werte konvergieren.

Mit Hilfe der OpenFOAM-Simulation können also die mittleren Geschwindigkeiten und Schwankungen der Windkanalmessungen zuverlässig nachgebildet werden.

Tabelle 7-3: Vergleich der simulierten (C) und gemessenen (M) Statistiken für die Geschwindigkeitskomponenten. Δ : $100|M-C|/u_{\text{ref}}$, mit u_{ref} als mittlere Anströmgeschwindigkeit aus den Windkanalversuchen.

	Mittelwerte			Standardabweichungen		
	<i>M</i> / m/s	<i>C</i> / m/s	Δ / %	<i>M</i> / m/s	<i>C</i> / m/s	Δ / %
u	30,2	29,8	1,3	0,5	2,4	6,3
v	0,0	-0,2	0,6	0,5	0,5	0
w	0,0	0,2	0,6	0,3	0,4	0,3

Um zu prüfen, ob die Geschwindigkeiten nicht nur statistisch, sondern auch in der zeitlichen Entwicklung gut abgebildet werden, werden die simulierten Geschwindigkeitsverläufe mit den Windkanalergebnissen für die Geschwindigkeitskomponenten u und v verglichen.

Die Entwicklung der u -Komponenten ist in Abbildung 7-19 über die normierte Zeit aufgetragen. Die normierte Zeit ist die Multiplikation der Zeit mit der Anregungsfrequenz von 10 Hz an den Flaps. Die Ergebnisse für die Geschwindigkeiten aus der OpenFOAM-Simulation (C) sind als gestrichelte Linien aufgetragen, während die Ergebnisse aus den Windkanalmessungen (M) als durchgezogene Linien dargestellt sind. Bei den dargestellten u -Komponenten handelt es sich um die Ergebnisse an 3 Sondenpositionen. Die gewählten Positionen sind bei $y = 0$ m in unterschiedlichen Höhen: $z = 0,13$ m (grün), $0,23$ m (blau) und $0,33$ m (rot). Die Abbildung der zeitlichen Verläufe zeigt für die Geschwindigkeiten an allen vertikalen Positionen eine niedrigere Geschwindigkeit in der OpenFOAM-Simulation gegenüber den experimentell ermittelten Versuchsergebnissen. Die niedrigere mittlere Geschwindigkeit aus Tabelle 7-3 ist also an allen Positionen gleichermaßen vorhanden. In der OpenFOAM-Simulation werden vermutlich die Blockadeeffekte des Klappensystems im Windkanal leicht unterschätzt. Die in den Windkanalergebnissen vorhandenen Schwankungen von bis zu $\pm 1,5$ m/s werden simuliert. Es ist auch zu erkennen, dass die Periodizität mit $t^* = 1$ in der Strömung nachgebildet wird und dass die Schwankungen in Phase sind. Die schnellen Schwankungen werden von der Simulation allerdings geglättet.

Die Geschwindigkeitskomponente u wird in der Simulation geringfügig unterschätzt, weist aber alle wesentlichen Eigenschaften der im Windkanal gemessenen Strömung auf (Frequenz korrekt wiedergegeben und Phasenlage eingehalten).

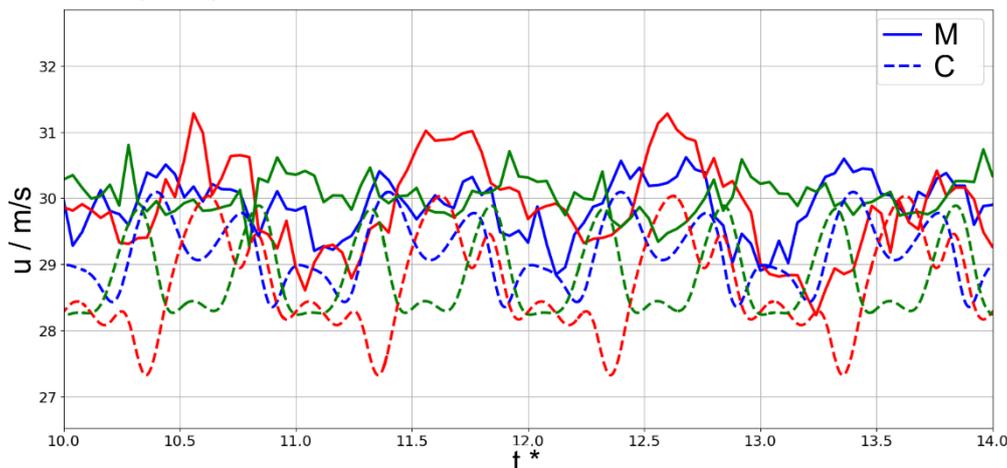


Abbildung 7-19: Vergleich Geschwindigkeitskomponente v zwischen den Messungen (M - durchgezogene Linie) und aus den OpenFOAM-Simulationen (C - gestrichelte Linie) in den Höhen $z = 0,13$ m (grün), $z = 0,23$ m (blau) und $z = 0,33$ m bei $y = 0$ m, mit $t^* = t \cdot f$ bei einer Frequenz von $f = 10$ Hz.

Neben der Geschwindigkeitskomponente u ist die Geschwindigkeitskomponente v von Interesse, da durch die Strömungsanregung mit den Flaps hier ein deutlicher Einfluss auf die Strömung und somit auf das Fahrzeug zu erwarten ist. Daher ist es wichtig, dass auch die Komponente v korrekt simuliert wird.

In Abbildung 7-20 sind die Quergeschwindigkeiten v – wie in Abbildung 7-19 für u – über die mit der Anregungsfrequenz normierte Zeit dargestellt. Die Anregungsfrequenz beträgt wie zuvor 10 Hz bei einer Amplitude von 10° . Die Ergebnisse stammen wie zuvor aus den Messungen im Windkanal (M) und den OpenFOAM-Simulationen (C). Die gewählten Positionen für die dargestellten Ergebnisse sind wieder bei $y = 0$ m in unterschiedlichen Höhen. Die verwendeten Höhen sind weiterhin $z = 0,13$ m (grün), $0,23$ m (blau) und $0,33$ m (rot).

Für alle Positionen ist in der Entwicklung der Geschwindigkeiten ein sinusförmiger Verlauf zu erkennen. Die Abstände zwischen den Maxima liegen bei $t^* = 1$. Die Geschwindigkeitskomponente v gibt also die sinusförmige Querbewegung der Flaps mit derselben Anregungsfrequenz wieder. Außerdem zeigt sich, dass die Phasenlage zwischen dem Versuch und der Simulation gut übereinstimmt. Auch die in der OpenFOAM-Simulation vorhergesagten Amplituden und absoluten Werte stimmen gut mit den im Windkanal gemessenen Schwankungen ($v' = \pm 2,5$ m/s) überein

Auch die im Windkanal auftretenden Quergeschwindigkeiten v werden sehr gut von der OpenFOAM-Simulation nachgebildet. So stimmen die absoluten Werte, die Phasenlagen und Amplituden zwischen den Simulationen und Messungen gut überein.

Der Vergleich der mittleren Geschwindigkeiten, der Schwankungen und der instationären Verläufe zeigt, dass die OpenFOAM-Simulationen die Windkanalversuche für die Geschwindigkeitsverläufe u und v gut nachbilden.

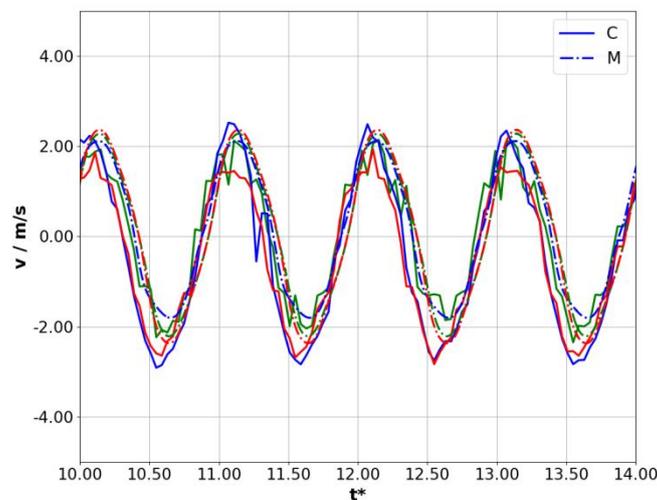


Abbildung 7-20: Vergleich Geschwindigkeitskomponente u zwischen den Messungen (M - durchgezogene Linie) und den OpenFOAM-Simulationen (C - gestrichelte Linie) in den Höhen $z = 0,13$ m (grün), $z = 0,23$ m (blau) und $z = 0,33$ m (rot) bei $y = 0$ m, mit $t^* = t \cdot f$ bei einer Frequenz von $f = 10$ Hz.

Druckfeld

Es wurde gezeigt, dass die Strömungen im Windkanal mit den OpenFOAM-Simulationen gut nachgebildet werden können. Im Folgenden wird dargestellt/diskutiert, wie gut die Auswirkungen der Anströmung auf das Fahrzeug bei den OpenFOAM-Simulationen und den Messungen übereinstimmen. Hierzu wird zunächst die globale Auswirkung auf das Fahrzeug in Form des Widerstandsbeiwertes betrachtet. Danach wird die Druckverteilung am Fahrzeug untersucht, um lokal an unterschiedlichen Fahrzeugbereichen Vergleiche zwischen den Simulationsergebnissen und den Windkanalergebnissen vornehmen zu können.

Tabelle 7-4 stellt die Ergebnisse der OpenFOAM-Simulationen für den Widerstandsbeiwert c_w und dessen Schwankungsbreite $c_{w,rms}$ den Windkanalergebnissen gegenüber. Die in den OpenFOAM-Simulationen berechneten Werte für den Widerstand und dessen Schwankung stimmen gut mit den Windkanalmessungen überein. Die Differenz des c_w -Werts beträgt lediglich 8 Widerstandspunkte. Die Differenz in der Schwankung des Beiwerts liegt bei 0,005. In Bezug auf den Widerstandsbeiwert der Windkanalmessung entspricht dieses einer Abweichung von 1,7 % für die Schwankung.

Die Kräfte können also mit nur geringen Abweichungen nachgebildet werden.

Tabelle 7-4: Vergleich der im Windkanal gemessenen Widerstandsbeiwerte mit den Ergebnissen der OpenFOAM-Simulationen:

	c_w	$\Delta c_{w,rms}$
Experiment	0,291	0,021
OpenFOAM-Simulation	0,299	0,026

Nachfolgend werden die Druckverteilungen am Fahrzeugmodell zwischen der OpenFOAM-Simulation und der Messung im Windkanal verglichen, um zu beurteilen wie gut die Druckverteilung am Fahrzeug nachgebildet werden kann. Hierzu werden die Drücke an der Fahrzeugfront, der Motorhaube und dem Dach betrachtet.

Abbildung 7-21 zeigt die Druckbeiwerte (links) und die Druckschwankungen (rechts) über die Breite y . Die Positionen der Messstellen befinden sich entlang der vorderen Stoßstange. In den beiden Grafen von Abbildung 7-21 sind die Ergebnisse für die Messung im Windkanal (M) als blaue Punkte und die OpenFOAM-Simulation (C) als rote Linien dargestellt. Die Oberflächendruckbeiwerte der OpenFOAM-Simulation stimmen – insbesondere im mittleren Bereich um $y = 0$ m – gut mit den Ergebnissen der Windkanalmessungen überein. An den Rändern der Stoßstange treten Abweichungen in den Druckbeiwerten auf. Auf Grund der sinusförmigen Querkomponente entstehen an den Rändern vermutlich kleine, periodische, lokale Ablösungen, die zu verringerten Drücken führen.

Die Druckschwankungen der OpenFOAM-Simulation liegen in der gleichen Größenordnung wie die Ergebnisse aus den Windkanalmessungen, zeigen jedoch untereinander Abweichungen im Verlauf an der Fahrzeugfront. Die Standardabweichung benötigt vermutlich deutlich mehr Zeitschritte für die Konvergenz als die Mittelwerte. Auf Grund der zum simulierten Zeitraum durch die Anregung mit 10 Hz erzeugten –verhältnismäßig langskaligen– Strukturen ist hier vermutlich der Einfluss auf die Schwankungen durch die Querkomponente noch nicht ausreichend berücksichtigt.

Die Druckbeiwerte an der Fahrzeugfront werden im mittleren Bereich gut nachgebildet. An den Rändern scheint es bei instationären Simulationen jedoch kleine Ablösungen zu geben, die im Windkanal nicht oder nicht so deutlich auftreten. Die Druckschwankungen befinden sich in der richtigen Größenordnung, jedoch wird die Verteilung der Schwankungen von der OpenFOAM-Simulation noch nicht hinreichend gut nachgebildet.

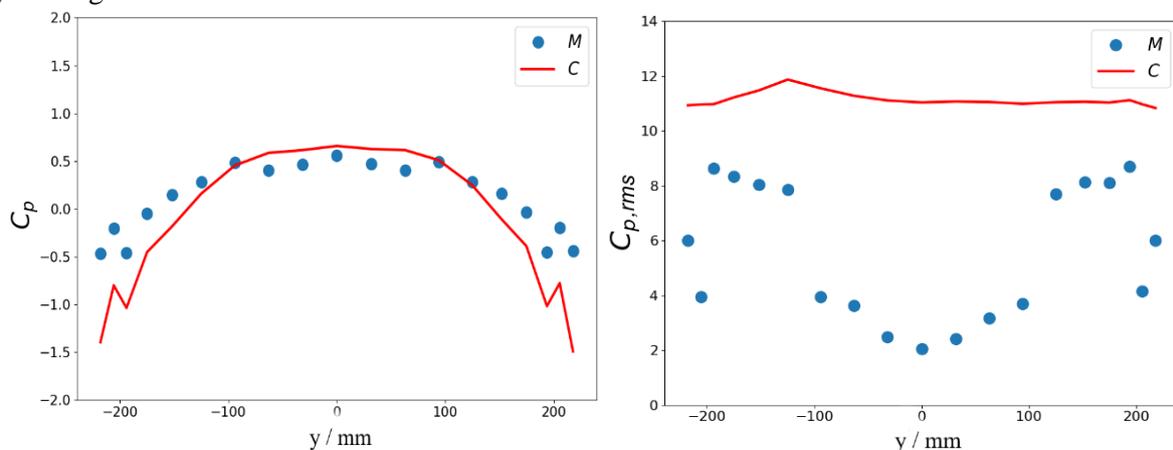


Abbildung 7-21: Verteilung der Druckbeiwerte c_p (links) und deren Schwankung $c_{p,rms}$ (rechts) über die Breite der vorderen Stoßstange für die Messung (M) im SWG und für die entsprechenden CFD-Simulationen (C).

In Abbildung 7-22 sind die Druckbeiwerte (links) und die Druckschwankungen (rechts) entlang der x-Achse im Fahrzeugkoordinatensystem aufgetragen. Die Druckbohrungen befanden sich an der Motorhaube, der Frontscheibe und am Dach bei $y = 0$ m. Wie in Abbildung 7-21 sind die Ergebnisse für die Windkanalmessung (M, blaue Punkte) und die OpenFOAM-Simulation (C, rote Linie) dargestellt. Der Druckverlauf der Messung und der OpenFOAM-Simulation stimmen gut überein. Lediglich am Übergang zwischen der Frontscheibe und dem Dach kommt es zu einer kleinen Abweichung. Die Druckschwankungen liegen, wie für die Stoßstange in Abbildung 7-21, in derselben Größenordnung, zeigen jedoch im Verlauf über die Fahrzeuglänge deutliche Abweichungen, insbesondere im vorderen Bereich. Es ist denkbar, dass die Strömungsstrukturen der Querkomponente nicht ausreichend lange erfasst wurden, um eine Konvergenz für die Druckschwankungen zu erreichen.

Die Drücke werden an der Motorhaube, der Frontscheibe und am Dach gut nachgebildet. Die Schwankungen liegen in der richtigen Größenordnung, weisen aber im Verlauf über die Fahrzeuglänge – insbesondere im vorderen Bereich – Abweichungen auf.

Die Verteilung der Druckbeiwerte zeigt, dass die OpenFOAM-Simulation – insbesondere im Bereich der Fahrzeugmitte – gut geeignet ist, die Drücke aus den Messungen nachzubilden. An der Fahrzeugfront scheint es in den Simulationen allerdings zu kleinen, lokalen Ablösungen zu kommen, die nicht korrekt abgebildet werden. Diese haben dadurch in der Simulation einen stärkeren Effekt auf die mittleren Drücke als im Experiment. Die Druckschwankungen scheinen deutlich länger als die Mittelwerte zu brauchen, um statistisch stationäre Werte zu erreichen.

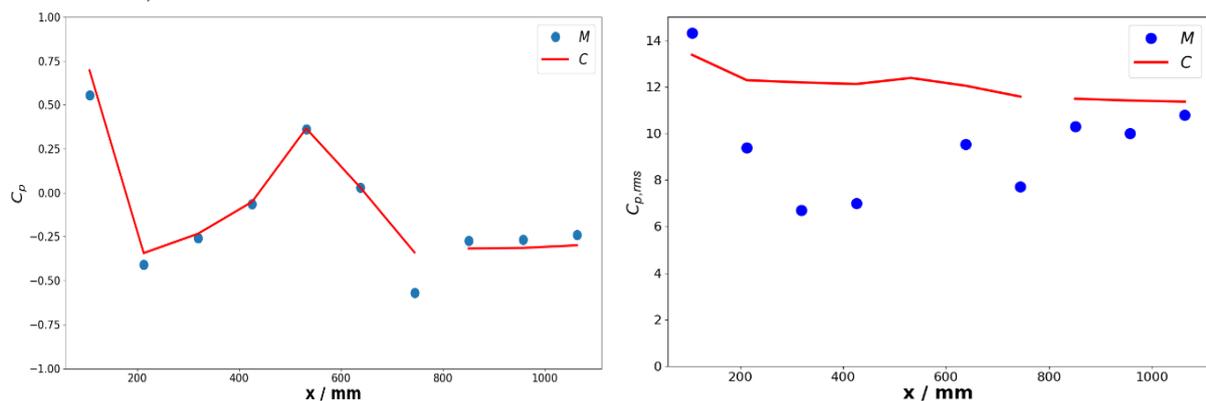


Abbildung 7-22: Verteilung der Druckbeiwerte c_p (links) und deren Schwankung $c_{p,rms}$ (rechts) entlang der Fahrzeugmittellinie und Motorhaube sowie am Dach für die Messung (M) im SWG und für die zugehörigen CFD-Simulationen (C).

Als nächstes werden die Strömungsstrukturen im Windkanal ausgewertet. Es soll untersucht werden, wie das Klappensystem die Strömung beeinflusst und wie diese Strömung mit dem Strömungsfeld um das Fahrzeug interagiert. Dadurch ergibt sich ein erster Eindruck des Einflusses der instationären Anregungen.

Abbildung 7-23 enthält dazu eine qualitative Darstellung der durch die Flaps erzeugten Strömung in Form der absoluten Wirbelstärke. Die gezeigte x-y-Ebene befindet sich 0,2 m über dem Boden. Die in den Nachläufen der Flaps erzeugten Strukturen sind hinter dem Klappensystem in Form von erhöhten Wirbelstärken zu erkennen. Entlang der x-Achse ist eine sinusförmige Schwingung der Strukturen bis zum Fahrzeug über die Fahrzeugbreite zu erkennen. Der durch das Klappensystem erzeugte Nachlauf wird dann am Fahrzeug umgelenkt und von den vom Fahrzeug erzeugten Strukturen gestört. Hinter dem Fahrzeug interagieren die von den Klappen erzeugten Strukturen dann mit den Strukturen aus dem Nachlauf des Fahrzeugs. Nach etwa 3 Fahrzeuglängen vermischen sich die beiden Strukturen. An der linken

Vorderseite des Fahrzeugs sind zudem Strukturen zu erkennen, die auf Ablösungen auf der windabgewandten Seite hindeuten.

Die bewegten Flaps erzeugen in der Strömung großskalige, sinusförmige Bewegungen. Diese nehmen in Richtung der Fahrzeugfront ab. Das Fahrzeug wird in der gesamten Breite von den Strukturen beeinflusst. An den Seiten des Fahrzeugs werden durch die instationäre Anströmung zum Teil lokale Ablösungen erzeugt. Unmittelbar hinter dem Fahrzeug überlagern sich die sinusförmig verlaufenden Strukturen von den Flaps mit dem Nachlauf des Fahrzeugs. Weiter stromabwärts interagieren die durch die Flaps erzeugten Strukturen mit den Strukturen aus dem Nachlauf des Fahrzeugs.

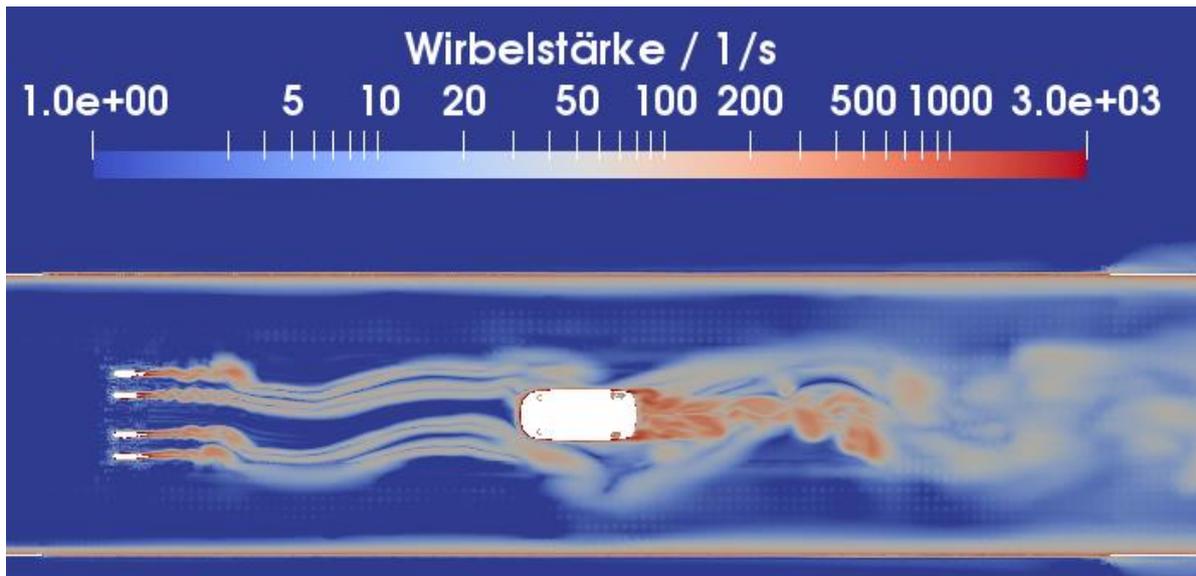


Abbildung 7-23: Wirbelverteilung in der Ebene $z = 0,2$ m über dem Kanalboden bei sinusförmiger Flapbewegung.

7.2.3 Zusammenfassung der Ergebnisse für die OpenFOAM-Simulationen

Das Ziel der OpenFOAM-Simulationen war eine möglichst genaue Nachbildung der instationären Umströmung eines Modellfahrzeuges bei einer instationären Anströmung zu simulieren, indem die Strömungsverhältnisse bei einer Hinterherfahrt im Abstand von 50 m zu einem Transporter möglichst gut nachgebildet werden. Hierzu wurden 2 Vorgehensweisen für OpenFOAM-Simulation entwickelt und vorgestellt. Die erste Vorgehensweise verwendet als Grundlage experimentelle Daten aus dem Fahrversuch auf der Teststrecke, um durch ein Rekonstruktionsverfahren Randbedingungen zu erzeugen, die die wichtigsten Eigenschaften der Anströmung wiedergeben. Zu diesen Eigenschaften gehören zum Beispiel die Anströmgeschwindigkeit, das Spektrum der Geschwindigkeit und großskaligen Strukturen in der Anströmung. Bei Verwendung dieser sogenannten HF-Randbedingung zeigt sich, dass wird das Geschwindigkeitsspektrum im tieferen Frequenzbereich gut nachgebildet. Die Anströmgeschwindigkeit wird allerdings leicht unterschätzt, da die HF-Randbedingung nicht alle in der Anströmung enthaltenen Längenskalen simulieren kann. Mit der HF-Randbedingung lassen sich flexibel auch andere beliebige Anströmverhältnisse aus Fahrversuchen nachbilden oder der Turbulenzgrad variieren, sofern detaillierte Informationen über die Anströmung vorliegen. Unabhängig davon die Untersuchungen, dass bei instationären Anströmungen eine ausreichend lange Zeit simuliert werden muss, damit die statistischen Momente 2. Ordnung nicht wesentlich von Einzelereignissen beeinflusst werden.

Bei der zweiten Vorgehensweise werden die im Windkanal vorherrschenden Bedingungen und Strömungsverhältnisse in einer OpenFOAM-Simulation nachgebildet. Dies erlaubt die Untersuchung von Fahrmanövern unter vereinfachten, klar definierten im Bedingungen um direkten Vergleich mit und in

der Erweiterung zu Windkanalmessungen. Für den Fall der Hinterherfahrt wurde das Klappensystem wie in den Windkanaluntersuchungen mit den oszillierenden Flaps bei 10° Ausschlag und einer Frequenz von 10 Hz durch ein Sliding Mesh betrieben, um die Zeit- bzw. Längenskalen zu beeinflussen. Diese vereinfachte Anströmung stellt – wie in 6.3.3 und 6.4 beschrieben – eine Annäherung an die Strömungsverhältnisse in den Fahrversuchen auf der Teststrecke dar. Die Ergebnisse liefern in großen Teilen gute Übereinstimmungen mit den Windkanalversuchen. So wird der Strömungsverlauf gut nachgebildet und die Druckverteilung über das Fahrzeug zeigt eine gute Übereinstimmung. Bezüglich der Druckschwankungen kommt es jedoch zu geringen Abweichungen. Mit dieser Vorgehensweise lassen sich also die Windkanalversuche simulieren. Die Strömung könnte jetzt in einem nächsten Schritt flexibel über die Klappenbewegung angepasst werden.

Für die Simulation der Strömung im Windkanal ergibt sich dabei eine gute Übereinstimmung mit den Widerstandsbeiwerten aus dem Experiment. Aus den Fahrversuchen auf der Teststrecke konnte kein c_w -Wert für einen Vergleich ermittelt werden, daher kann hier kein direkter Vergleich mit den HF-Randbedingungen stattfinden. Die Druckverteilungen zwischen der Versuchsfahrt und der HF-Randbedingung bei 6 % stimmen in den betrachteten Bereichen jedoch gut überein. In den Versuchen mit der HF-Randbedingung konnte außerdem gezeigt werden, dass eine Abhängigkeit des c_w -Werts von der Turbulenzintensität besteht.

Beim Vergleich der beiden Vorgehensweisen weist die Simulation der Windkanalströmung Vorteile bei der Implementierung auf und erfordert weniger Ressourcen, um die wesentlichen Strömungsbedingungen in der Messstrecke zu reproduzieren. Die HF-Randbedingung ermöglicht hingegen das Fahrmanöver direkt, ohne Umweg über einen Windkanalabgleich zu simulieren. Des Weiteren besitzt diese Methode für die HF-Randbedingungen mehr Freiheitsgrade. Dies kann von Nachteil sein, da mehr Informationen benötigt werden, erlaubt aber auch deutlich mehr Flexibilität in den simulierbaren Anströmbedingungen.

Da bei beiden Vorgehensweisen instationäre Strömungen betrachtet werden, muss die Strömung über einen ausreichend langen Zeitraum simuliert werden, was einen erheblichen Rechenaufwand erfordert. Ein Überblick über den potentiellen rechnerischen Aufwand ist in Tabelle 7-5 zu finden. Dieser ist in Verbindung mit Tabelle 4-4 – den verwendeten Rechengittern – zu betrachten.

Tabelle 7-5: Übersicht der benötigten Rechenleistungen sowie des zugehörigen Zeitaufwands für die numerischen Arbeiten in OpenFOAM.

Aufgabe	Kommentar	Dauer der Aufgabe
CAD-Vorbereitung	Detaillierte STL-Datei, erheblicher Vorbereitungsaufwand	30 Tage
Generierung des Netzes	> 160 CPUs	7 Tage
RANS	> 160 CPUs ~20000 Wiederholungen, Netzgröße ~80 Mio. Punkte	14 Tage
DDES	> 1000 CPU ~1 konvektive Zeiteinheit ~120 Mio. Punkte	14 Tage

8 Zusammenfassung

Ziel des Projekts „Auswirkung von instationären Anströmeffekten auf die Fahrzeugaerodynamik“ war die Entwicklung einer Methode zur Ermittlung von Luftkraftbeiwerten in Windkanälen unter Berücksichtigung von realen, instationären Anströmsituationen der Straße. Um die realen, instationären Anströmbedingungen zu bestimmen, wurden umfangreiche Untersuchungen zur Anströmung eines Fahrzeugs im öffentlichen Straßenverkehr und in Fahrversuchen auf Teststrecken für spezifische Fahrmanöver durchgeführt. Basierend auf den Ergebnissen wurden unterschiedliche technische Systeme für Windkanaluntersuchungen und Modellierungsansätze für CFD-Simulationen entwickelt und validiert, mit denen die instationäre Anströmungen aus den Fahrversuchen gut nachgebildet werden können.

8.1 Straßenfahrt und Teststrecke

Zu Beginn wurden die auf der Straße vorhandenen Strömungsbedingungen ermittelt, um die Zielgrößen für die Methodenentwicklung zu identifizieren. Hierzu wurden sowohl Fahrversuche im Straßenverkehr auf deutschen Autobahnen als auch auf Teststrecken durchgeführt. Die Straßenfahrt repräsentiert dabei den allgemeinen im Straßenverkehr auftretenden Strömungszustand. Daraus wurden die drei typischen, individuellen Verkehrssituationen Hinterherfahrt, Überholmanöver und der impulsartige Seitenwind abgeleitet, die auf unterschiedlichen Teststrecken – ungestört von anderen äußeren Einflüssen – untersucht wurden. Dabei hat sich gezeigt, dass die Hinterherfahrt ein häufig auftretendes, statistisch stationäres Fahrmanöver repräsentiert. Im Gegensatz dazu repräsentiert das Überholmanöver eine instationäre Fahrsituation und der instationäre Seitenwind eine Fahrsituation, die durch eine plötzlich und einmalig auftretende Strömungsänderung entsteht.

Für die Straßenfahrt im Autobahnverkehr wurde festgestellt, dass die Anströmwinkelverteilung nahezu einer Normalverteilung entspricht, deren Standardabweichung und Mittelwert von der Verkehrsdichte und Fahrgeschwindigkeit abhängen. Die mittleren Anströmwinkel für die Fahrgeschwindigkeit von 27,8 m/s liegt dabei in einem Bereich von $\mu_\beta = -1^\circ$ bis 3° , während die Standardabweichung zwischen $\sigma_\beta = 2,2^\circ$ und $2,9^\circ$ beträgt. Des Weiteren tritt eine mittlere Anströmgeschwindigkeit auf, die 86 % der Fahrgeschwindigkeit entspricht. Die Turbulenzintensitäten in x- und y-Richtung erreichen dabei Werte bis 25 %, treten jedoch hauptsächlich im Bereich von 5 % - 7 % auf. Das integrale Längenmaß liegt im Mittel bei 1 m, kann jedoch Werte von über 12 m erreichen. Die Druckverteilung am Fahrzeug wird nur geringfügig durch die Verkehrsdichte beeinflusst, die Druckschwankungen weisen jedoch einen deutlichen Anstieg auf, sobald eine größere Anzahl von Verkehrsteilnehmern beteiligt ist.

Bei der Hinterherfahrt auf der DLR-Teststrecke in Trauen folgte das Versuchsfahrzeug einem vorherfahrenden Transporter mit Kofferaufbau in unterschiedlichen, aber konstanten Abständen zwischen 10 m und 100 m bei konstanter Geschwindigkeit. Die Turbulenzintensität erhöht sich dabei mit geringer werdenden Abständen von 1 % auf bis zu 25 %. Die integralen Längenmaße reduzieren sich bei kleiner werdenden Abständen von über 10 m auf 0,25 m. Das Verhältnis der Turbulenzintensität für die Längs- und Quergeschwindigkeit ist dabei gleich, während die Turbulenzintensität in vertikaler Richtung 30 % kleiner ist. Des Weiteren treten periodische Strukturen im Bereich von 2,5 Hz für die Quergeschwindigkeit auf. Die Korrelation der Geschwindigkeitskomponenten zeigt, dass es sich bei den auftretenden Strukturen in Querrichtung um Strukturen in der Größenordnung des Fahrzeugs handelt. Mit abnehmendem Abstand zwischen den Fahrzeugen nimmt auch die Anströmgeschwindigkeit gegenüber der Fahrgeschwindigkeit ab. Die instationäre Anströmung wirkt sich ebenfalls auf die Druckverteilung und insbesondere auf die auftretenden Druckschwankungen aus.

Mit dem Überholmanöver wurde ein typisches Fahrmanöver ausgewählt, das sich durch stark instationäre Strömungsverläufe auszeichnet. Das Überholmanöver wird durch 4 Phasen charakterisiert:

- 1. Phase: Annäherung des Versuchsfahrzeugs an das zu überholende Fahrzeug – Gleichmäßig über das Versuchsfahrzeug verteilte, zufällige Geschwindigkeitsschwankungen
- 2. Phase: Direkter Nachlauf – Periodische Strukturen, die unterschiedlich stark über die Fahrzeugbreite verteilt sind, da – von der linken Seite beginnend – das Fahrzeug allmählich den Nachlaufbereich verlässt.
- 3. Phase: Vorbeifahrt – Großskalige, starke Änderungen der Geschwindigkeitskomponenten – ausgelöst durch die Verdrängung der Strömung auf Grund des vorherfahrenden Fahrzeugs – bestimmen die Anströmung, während die zufälligen Schwankungen nur noch geringfügig auftreten.
- 4. Phase: Freie Anströmung – Die Anströmung weist nur geringe Schwankungen auf und entspricht in ihren Eigenschaften der Konstantfahrt.

Der impulsartige Seitenwind repräsentiert eine plötzliche, starke Änderung der Anströmbedingungen das als Fahrmanöver an der BMW-Seitenwindanlage in Aschheim für unterschiedliche Anströmwinkel untersucht werden konnte. Der Vorteil dieser Anlage ist, dass die Strömung im Seitenwindbereich als nahezu konstant angenommen werden kann und somit zeitliche Effekte – ausgelöst durch plötzliche Änderungen – gut untersucht und mit quasi-stationären Anströmungen verglichen werden können. Mit den Fahrversuchen auf der BMW-Teststrecke konnte gezeigt werden, dass die Drücke an der Front des Fahrzeugs auf der windzugewandten Seite nahezu instantan auf die geänderte Anströmsituation reagieren, wogegen die Druckwerte auf der windabgewandten Seite mit einer zeitlichen Verzögerung reagieren. Zusätzlich tritt auf der windabgewandten Seite ein Überschwingen im Druck auf, bevor sich ein stationärer Zustand für die neuen Anströmbedingungen einstellt. Auch am Dach und am Heck kommt es zu Verzögerungen des Drucks, bis ein stationärer Zustand im Seitenwind erreicht wird. Diese Verzögerungen sind zum Teil länger als der Zeitunterschied, den man aufgrund des späteren Eintritts in den Seitenwind infolge der Fahrzeuglänge erwarten würde. Für plötzliche Änderungen der Anströmungen ist eine quasi-statische Betrachtung also nicht geeignet.

Die untersuchten Fahrmanöver der Hinterherfahrt, des Überholmanövers und des impulsartigen Seitenwinds zeigen deutliche Änderungen in der Druckverteilung am Fahrzeug gegenüber der Konstantfahrt, die als Referenzfall ebenfalls auf der DLR-Teststrecke in Trauen erfasst wurde. Dies weist darauf hin, dass die instationären Anströmbedingungen während der Fahrmanöver einen deutlichen Einfluss auf die instationären Luftwiderstandsbeiwerte haben und näher zu untersuchen sind.

Mit Hilfe der Ergebnisse aus den Fahrversuchen wurden im nächsten Schritt Untersuchungsmethoden entwickelt, mit denen die ermittelten Strömungsbedingungen nachgebildet werden können. Dabei wurden sowohl experimentelle als auch numerische Methoden betrachtet.

8.2 Simulation der Strömung verschiedener Fahrmanöver

Die experimentellen Untersuchungen wurden an vier unterschiedlichen Untersuchungsanlagen durchgeführt: Dem Modellwindkanal und dem Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal der Universität Stuttgart (offene Windkanäle) sowie in der Seitenwindversuchsanlage (geschlossener Windkanal) und der Tunnel-simulationsanlage des DLR Göttingen. Mit den Windkanälen wurden zunächst Untersuchungen zur Anströmung bei unterschiedlichen Anregungsmethoden durchgeführt.

Dabei wurden sowohl unterschiedliche passive Systeme, wie Gitter und Turbulenzerzeuger, als auch aktive Systeme mit bewegten Flügeln (FKFS *swing*[®]) und bewegten Flaps, die an statischen Flügeln

installiert sind, (DLR-Klappensystem) getestet. Beide aktiven Systeme weisen eine hohe Flexibilität auf und können bei Bedarf gut für die Simulation von unterschiedlichen Anströmbedingungen angepasst werden. Mit diesen aktiven Systemen können in Querrichtung Turbulenzintensitäten von bis zu 12 % und Längenskalen von mindestens 0,5 m erreicht werden. Zusätzlich konnte gezeigt werden, dass die Verwendung der untersuchten passiven Turbulenzerzeuger in Verbindung mit einem aktiven Klappensystem in dem geschlossenen Windkanal SWG die gezielte Beeinflussung der Schwankungsbewegung in allen Raumrichtungen zulässt. In der offenen Messstrecke dagegen dominieren die getesteten passiven Elemente in der Düsenvorkammer die Strömungsbedingungen. Diese Herausforderung könnte jedoch mit angepassten passiven Anordnungen gelöst werden.

Die bei den Straßenfahrten sowie bei der Konstant- und Hinterherfahrt auf den Teststrecken gemessenen Anströmwinkel und die Turbulenzintensität wurden im Modellwindkanal der Universität Stuttgart mit Hilfe des FKFS *swing*[®] in Querrichtung erfolgreich nachgebildet. Der Vergleich der Signale für unterschiedliche Fahr Situationen und Verkehrsdichten zeigt eine Abhängigkeit der Oberflächendruckverteilung und insbesondere der Druckschwankungen vom Eingangssignal der Strömung. Die unterschiedlichen Signale der Straßenfahrt zeigen eine Zunahme des Luftwiderstandsbeiwerts um bis zu 0,005 für Signale mit hohen Amplituden (hohe Verkehrsdichte).

Neben der Auswirkung unterschiedlicher Anregungsformen in der Anströmung wurden Einflüsse von Geometrievariationen und ihre Wirksamkeit in Bezug auf den Luftwiderstandsbeiwert unter instationären Anströmbedingungen im Modellwindkanal der Universität Stuttgart untersucht. Dabei zeigt sich, dass eine instationäre Anströmung deutliche Auswirkungen auf die Wirksamkeit der Geometrievariationen haben kann. Die instationären Anströmbedingungen verursachen im Vergleich zur stationären Anströmung zum Teil keinen oder einen negativen Einfluss auf den Luftwiderstandsbeiwert, während andere Geometrievariationen sich als deutlich effizienter erwiesen. Die instationäre Anregungsform hat dabei einen Einfluss auf die absolute Änderung des Luftwiderstandsbeiwertes. Die Wirksamkeit der Bauteile in Relation untereinander wird aber qualitativ nicht wesentlich durch eine veränderte Anströmung beeinflusst. Die Übertragbarkeit der Versuche im Modellmaßstab auf die originale Fahrzeuggröße zeigt vergleichbare Ergebnisse.

Um die Effekte unterschiedlicher Skalierungen zu überprüfen, wurden die 1:4 Messungen im Modellwindkanal der Universität Stuttgart mit modifizierten Anbauteilen in 1:1 Messungen im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal wiederholt, da hier ein entsprechendes FKFS *swing*[®]-System zur Verfügung stand. Die Ergebnisse zeigen, dass die Trends der Luftwiderstandsänderungen bei gleichen Signalen bestätigt werden können, allerdings kann es teilweise zu geringen Abweichungen in der Amplitude kommen. Dennoch lässt sich das FKFS *swing*[®]-System gut zwischen den Kanälen skalieren ohne wesentliche Abweichungen in den Ergebnissen hervorzurufen.

Auch in der Seitenwindversuchsanlage mit Klappensystem in Göttingen (SWG) können die Fahrmanöver Hinterherfahrt und Überholmanöver instationär nachgebildet werden. Auf Grund der hohen Dynamik des DLR-Klappensystems kann ein Großteil der im Fahrversuch in der Anströmung gemessenen Turbulenzintensitäten und Längenskalen erzeugt werden. Voraussetzung hierfür ist die gleichzeitige Nutzung von passiven Turbulenzgeneratoren. Der Vergleich der gemessenen Oberflächendrucke und Druckschwankungen der Fahrmanöver Hinterherfahrt und Überholmanöver in den Fahrversuchen mit den Windkanaluntersuchungen im SWG am Fahrzeug bzw. Modell zeigt eine gute Übereinstimmung.

Zusätzliche Untersuchungen der Hinterherfahrt für unterschiedlichen Anregungsformen der Flaps im SWG zeigen zudem, dass sich Unterschiede der in der Anströmung angeregten Strukturen deutlich in der Druckverteilung am Fahrzeug auswirken. In diesem Sinne liefert eine Anregung mit den zeitlichen Verläufen aus den Fahrversuchen auf der Teststrecke die beste Übereinstimmung zwischen den im

Windkanal und in den Fahrversuchen ermittelten mittleren Druckbeiwerte und Druckschwankungen. Zusätzlich wurde auch die Veränderung im Widerstandsbeiwert untersucht. Hierbei zeigte sich, dass die Widerstandsbeiwerte bei veränderten Anströmbedingungen aber gleicher Anströmgeschwindigkeit um bis zu 0,012 ansteigen können. Die Form der Anströmung hat dabei auch hier einen deutlichen Einfluss auf die Änderung des Widerstandsbeiwerts. Im Gegensatz zu einer realistischen – aus den auf der Teststrecke gemessenen Anströmwindwinkeln hergeleiteten – Anströmungsform $HF-xx$ sind die Änderungen im Widerstandsbeiwert bei sinusförmigen Anregungsformen (*Sinus-Par. xx*) kleiner. Obwohl die Auswirkung einer verringerten Anströmgeschwindigkeit im Windkanal nicht untersucht wurde, zeigt eine Abschätzung, dass die Widerstandsbeiwerte bei verringerter Anströmgeschwindigkeit gegenüber denen der Fahrgeschwindigkeit abnehmen. Der Trend im Widerstandsbeiwert, wenn man die einzelnen Anregungsformen vergleicht, bleibt dabei jedoch nahezu unverändert.

Für den Fall der instationären Anströmung während eines Überholmanövers wurden im SWG instationäre Kraftmessungen durchgeführt. Der zeitliche Verlauf der Kraftmessung weist dabei Eigenschaften auf, die auf die unterschiedlichen Anströmbedingungen während der 4 Phasen hindeuten. Es ist also ein direkter Zusammenhang zwischen den instationären Anströmbedingungen und den instationären Kräften erkennbar. Insbesondere in der 3. Phase des Überholmanövers treten dabei Schwankungen des Widerstandsbeiwertes von bis zu 0,010 und des Seitenkraftbeiwertes von über 0,120 auf.

Die Ergebnisse aus den Windkanalversuchen zeigen, dass eine instationäre Simulation der Anströmung sinnvoll ist. Unter instationären Anströmbedingungen verändert sich nicht nur der Gesamtwiderstand, sondern es wird auch die Effektivität von einzelnen aerodynamischen Bauteilen beeinflusst. Sowohl in den Versuchen im MWK als auch im SWG zeigte sich, dass eine quasi-stationäre Betrachtung den Widerstandsbeiwert bei instationären Anströmbedingungen unterschätzt.

Als geeignetster Ansatz erwiesen sich bewegliche Flügel bzw. statische Flügel mit beweglichen Flaps. Ein zusätzlicher Einbau von passiven Turbulenzgeneratoren scheint sinnvoll, wobei deren Wirkung stark vom Gesamtaufbau abzuhängen scheint und aus diesem Grund weiterer Untersuchungen bedarf. In den vorliegenden Untersuchungen konnten diese passiven Turbulenzgeneratoren bisher nur im geschlossenen Windkanal in Kombination mit den statischen Flügeln und bewegten Flaps erfolgreich eingesetzt werden.

Die Untersuchungen zeigen, dass folgendes Vorgehen zur Anwendung der aktiven Systeme zur Strömungsanregung sinnvoll ist:

- Ermittlung der zu simulierenden Strömung (z.B. Zeitverlauf des Anströmwindwinkels während eines Fahrmanövers, Signale von Straßenfahrten)
- Einbau eines Flügelsystems im Düsenbereich des Windkanals (+ evtl. passive Systeme)
- Ermittlung einer Transferfunktion von Flapbewegung und Strömungsausschlag in Abhängigkeit von Anstellwinkel, Flapfrequenz und Geschwindigkeit
- Umwandeln des zeitlichen Verlaufs des Anströmwindwinkels in eine Flapbewegung mit Hilfe der Transferfunktion zur Erzeugung der instationären Anströmung in der Messstrecke

Eine zusätzliche Variation der Flapbewegung über die Kanalbreite hat sich dabei in Bezug auf eine realistischere Simulation der Strömung als vorteilhaft erwiesen.

Einen Sonderfall bei den Untersuchungen bildet der impulsartige Seitenwind. Da sich hier die Anströmbedingungen in sehr kurzer Zeit verändern und große Anströmwindwinkel erreicht werden können, sind die klassischen Windkanäle mit aktiven Systemen nicht ideal. Die Untersuchungen wurden daher in einer für den Automobilbereich neuartigen Anlage – der Tunnelsimulationsanlage Göttingen – durchgeführt.

führt. In dieser Anlage wird ein Modell durch ein Katapultsystem beschleunigt und durch einen Seitenwindbereich geführt. Dies führt zu einer realitätsnahen Relativbewegung zwischen dem Fahrzeug, dem Boden und der kontinuierlichen Einfahrt in die Scherschicht und den Seitenwind. Insbesondere die Relativbewegung zwischen der Scherschicht und dem Seitenwind ist wichtig, um die Strömungseigenschaften des plötzlich auftretenden Seitenwinds möglichst realitätsnah darstellen zu können. Der Seitenwind tritt somit nicht zeitgleich über dem gesamten Fahrzeug auf, wie es beispielsweise bei der Drehung des Modells der Fall wäre, sondern breitet sich kontinuierlich über das Fahrzeug aus.

Mit der vorgestellten Messanlage sind Anströmwinkel von bis zu $\beta = 30^\circ$ möglich. Der graduelle Eintritt in die Scherschicht kann mit dem mitgeführten Messsystem aufgelöst werden. Dabei können deutlich die Veränderungen der Drücke bei unterschiedlichen Anströmwinkeln und über die Breite gezeigt werden. Der Vergleich der Druckverteilung mit den Ergebnissen der Versuchsfahrten an der Seitenwindanlage zeigt die gleichen Tendenzen und die mittleren Werte werden im Seitenwindbereich zuverlässig vorhergesagt. Die instationären Drücke unterscheiden sich, was aber wahrscheinlich den unterschiedlichen Strömungsqualitäten in der TSG und der BMW-Versuchsanlage in Aschheim geschuldet ist. Die relative Auswirkung unterschiedlicher Anströmwinkel auf die Widerstands- und Seitenkräfte und somit die Fahrzeugreaktion kann mit Hilfe der Oberflächendrücke abgeschätzt werden. Dabei zeigen sich beispielweise für den Widerstand zeitliche Verläufe, die sich erst allmählich den veränderten Strömungsbedingungen anpassen. Diese Verzögerung würde beispielsweise von quasi-statischen Methoden nicht erfasst werden und bestätigt die Notwendigkeit dieser instationären Untersuchung.

Es konnte gezeigt werden, dass die – im Straßenverkehr und bei individuellen Fahrmanövern – gemessenen Strömungsbedingungen und deren Auswirkung auf das Fahrzeug mit den Versuchsanlagen zuverlässig nachgebildet werden können. Die instationären Anströmungen führen dabei zu einer Veränderung der mittleren und dynamischen Drücke sowie der Luftkraftbeiwerte. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass die Effizienz von aerodynamischen Bauteilen beeinflusst wird.

8.3 CFD-Simulationen

Neben den experimentellen Methoden wurden numerische Methoden mit dem Ziel verwendet die instationären Anströmbedingungen und deren Einfluss auf das Fahrzeug auf unterschiedliche Arten nachzubilden. Für die numerischen Methoden wurden sowohl Simulia PowerFLOW[®] als auch OpenFOAM verwendet.

In CFD wurden zur Untersuchung der instationären Anströmeffekte, analog zu den Experimenten, folgende Simulationsfälle betrachtet:

- Sinusförmige Anströmung bei unterschiedlichen Amplituden und Frequenzen (PowerFLOW[®])
- Amplitude und Normalverteilung der Straßenfahrtsignale (PowerFLOW[®])
- Anströmbedingungen aus der Konstantfahrt und der Hinterherfahrt (PowerFLOW[®]/OpenFOAM)
- Variation der Turbulenzintensität während der Hinterherfahrt (OpenFOAM)
- Im Windkanal durch bewegte Flaps hervorgerufene Strömungsbedingungen (OpenFOAM)

Es wurden Parameterstudien zur sinusförmigen Anströmung in PowerFLOW[®] durchgeführt, dabei konnte sowohl ein Einfluss der Frequenz als auch der Amplitude auf den Luftwiderstandsbeiwert festgestellt werden. Mit höheren Amplituden steigt der Luftwiderstandsbeiwert um bis zu 0,020 bei 10° an.

Des Weiteren wurden die statistischen Eigenschaften (Normalverteilung und Amplitude der Anströmwinkel) der Anströmung, wie sie bei Straßenfahrten auftreten, bei unterschiedlichen Verkehrsdichten

simuliert und deren Auswirkung auf den Luftwiderstandsbeiwert analysiert. Dabei wurden die gleichen Geschwindigkeitskomponenten über den gesamten Einlass vorgegeben. Die Ergebnisse für die Simulation der Straßenfahrt in PowerFLOW® zeigen, dass der Luftwiderstand mit zunehmender Signalstärke steigt. Der Luftwiderstand nimmt dabei um bis zu 0,008 zu und ist mit dem Modellwindkanal der Universität Stuttgart, der eine Steigerung von 0,005 zeigt, vergleichbar. Der Anstieg des Luftwiderstandsbeiwerts liegt zwischen den für die Vergleichsmessungen ermittelten Werten im Modellwindkanal und den Werten der 1:1-Windkanalmessungen am Versuchsfahrzeug.

Zusätzlich wurden die Anströmsituationen der Konstant- und Hinterherfahrt mit orts- und zeitabhängigen Randbedingungen simuliert. Die Simulation der Konstantfahrt führt zu einem um 0,003 reduzierten Luftwiderstandsbeiwert. Im Gegensatz hierzu erhöht sich der Luftwiderstandsbeiwert mit den Anströmbedingungen aus der Hinterherfahrt um fast 0,014. Die Simulationen zeigen dabei einen Einfluss der zeitabhängigen Strömungsgeschwindigkeiten auf den Luftwiderstandsbeiwert. Die mittlere Druckverteilung der Konstant- und Hinterherfahrt werden gut simuliert, jedoch kommt es zu Abweichungen in den Druckschwankungen entlang der Motorhaube und des Daches.

Um die auf der Teststrecke gemessenen Anströmbedingungen möglichst direkt in die numerischen Simulationen übertragen zu können, wurde in OpenFOAM eine neuartige Methode zur Erstellung der Randbedingungen aus den Messdaten entwickelt. Hierzu wurden die an den Sondenposition des Arrays bei der Hinterherfahrt lokal gemessenen Geschwindigkeitskomponenten der Hinterherfahrt in einem x-y-Bereich interpoliert und als Randbedingung vorgegeben. Im äußeren, ungestörten Bereich wurden die Ergebnisse aus der Konstantfahrt in Verbindung mit einer natürlichen atmosphärischen Grenzschicht vorgegeben (*HF-Randbedingung*). Somit konnten die zwei wesentlichen Bereiche der Anströmung nachgebildet und die Auswirkung der Strömung auf das Versuchsfahrzeug während der Hinterherfahrt untersucht werden. Die instationären Anströmbedingungen führten zu einem Anstieg des Widerstands um 0,004, wobei die Verteilung der mittleren Druckbeiwerte an der Fahrzeugoberfläche gut übereinstimmt. Lediglich die Druckschwankungen zeigen Abweichungen, die auf eine unzureichende Simulationsdauer und damit einer nicht auskonvergierten statistischen Mittelung zuzuschreiben sind.

Des Weiteren sollte betrachtet werden, wie sich eine veränderte Turbulenzintensität auf den Widerstandsbeiwert auswirkt. Hierzu wurde die Randbedingung so modifiziert, dass über die Geschwindigkeitsschwankung der u-Komponente Tu_x zwischen 2 % und 10 % variiert werden konnte, was zu einer Erhöhung des Widerstandsbeiwertes um bis zu 0,029 führt. Mit den OpenFOAM-Simulationen für unterschiedlichen Turbulenzintensitäten kann gezeigt werden, dass der Widerstandsbeiwert sensitiv gegenüber Änderungen von Tu_x ist. Dabei wurden die Widerstandsbeiwerte, je nach Turbulenzgrad, um bis zu 0,029 erhöht.

Zur Nachbildung der Strömung im Windkanal wurde in OpenFOAM ein Sliding-Mesh zur Simulation der Flapbewegung verwendet. Das hierdurch berechnete Strömungsfeld bei einer sinusförmigen Anregung stimmt gut mit dem Strömungsfeld aus den Windkanalexperimenten überein. Die Widerstandsbeiwerte weichen mit 0,008 nur geringfügig von den experimentellen Ergebnissen ab. Während die Druckverteilung an der Motorhaube und am Dach wieder gute Übereinstimmungen mit den experimentellen Ergebnissen zeigt, kommt es für auch hier bei den Druckschwankungen zu Abweichungen.

Die in den Fahrversuchen identifizierten Anströmbedingungen wurden in den CFD-Simulationen umgesetzt. Die vorhergesagten Druckbeiwerte stimmen gut mit den in den Fahrversuchen gemessenen Druckverteilungen überein, jedoch bestehen Abweichungen in den instationären Druckschwankungen. Analog zu den Windkanalversuchen zeigen sich bei den instationären Anströmbedingungen höhere Widerstandsbeiwerte in den Simulationen.

8.4 Fazit

Die Ergebnisse dieses Forschungsprojekts bieten eine umfangreiche Datenbasis verschiedener Fahrversuche – im Straßenverkehr und auf der Teststrecke – und bilden damit die Grundlage, diese in verschiedenen Untersuchungswerkzeugen darzustellen. Die Unterschiede zwischen stationären und instationären aerodynamischen Eigenschaften wurden für verschiedene Fahrsituationen und in experimentellen und numerischen Untersuchungsumgebungen ermittelt und analysiert. In dieser Arbeit werden wichtige Erkenntnisse gewonnen, die zukünftig helfen die Fahrzeugaerodynamik besser verstehen zu können und das resultierende Wissen im Entwicklungsprozess einzusetzen.

Literatur

- [1] Widdecke, N., Estrada G., and Berneburg, H., "Vergleich verschiedener Konzepte der Bodensimulation und von drehenden Rädern zur Nachbildung der Straßenfahrt im Windkanal und deren Auswirkung auf Fahrzeuge," FAT Schriftenreihe 202, 2006.
- [2] Jessing, C., Wilhelmi, H., Wittmeier, F., Wiedemann, J. et al., "Characterization of the Transient Airflow Around a Vehicle on Public Highways," 12th FKFS-Conference: Progress in Vehicle Aerodynamics and Thermal Management, Stuttgart, October 2019.
- [3] Birkert, A., Haage, S., and Straub, M. (eds.), "Umformtechnische Herstellung komplexer Karosserieteile," Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-642-34669-9, 2013.
- [4] Stoll, D., Schoenleber, C., Wittmeier, F., Kuthada, T. et al., "Investigation of Aerodynamic Drag in Turbulent Flow Conditions," *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* 9(2):733–742, 2016, doi:[10.4271/2016-01-1605](https://doi.org/10.4271/2016-01-1605).
- [5] Windsor, S., "Real world drag coefficient – is it wind averaged drag?," in: *The International Vehicle Aerodynamics Conference*, Elsevier, ISBN 9780081001998:3–17, 2014.
- [6] Wordley, S. and Saunders, J.W., "On-road Turbulence," *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* 1(1):341–360, 2009, doi:[10.4271/2008-01-0475](https://doi.org/10.4271/2008-01-0475).
- [7] O'Neill, P.L., Nicolaidis, D., Honnery, D., and Soria, J., "Autocorrelation functions and the determination of integral length with reference to experimental and numerical data," 15th Australasian Fluid Mechanics Conference, University of Sydney, Australia, 2004.
- [8] Taylor, G.I., "The Spectrum of Turbulence," *Proceedings of the Royal Society of London. Series A - Mathematical and Physical Sciences* 164(919):476–490, 1938, doi:[10.1098/rspa.1938.0032](https://doi.org/10.1098/rspa.1938.0032).
- [9] Lindener, N., Miehl, H., Cogotti, A., Cogotti, F. et al., "Aeroacoustic Measurements in Turbulent Flow on the Road and in the Wind Tunnel," *SAE Technical Paper 2007-01-1551*, 2007, doi:[10.4271/2007-01-1551](https://doi.org/10.4271/2007-01-1551).
- [10] Wordley, S., "On Road Turbulence," PhD Thesis, Monash University, Australia, 2009.
- [11] Wordley, S. and Saunders, J.W., "On-road Turbulence: Part 2," *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* 2(1):111–137, 2009, doi:[10.4271/2009-01-0002](https://doi.org/10.4271/2009-01-0002).
- [12] McAuliffe, B.R., Belluz, L., and Belzile, M., "Measurement of the On-Road Turbulence Environment Experienced by Heavy Duty Vehicles," *SAE Int. J. Commer. Veh.* 7(2):685–702, 2014, doi:[10.4271/2014-01-2451](https://doi.org/10.4271/2014-01-2451).
- [13] Schröck, D., Widdecke, N., and Wiedemann, J., "On-Road Wind Conditions Experienced by a Moving Vehicle," in: Wiedemann, J. (ed.), *Progress in Vehicle Aerodynamics and Thermal Management V*, expert, Renningen, ISBN 978-3-8169-2771-6, 2008.
- [14] Wojciak, J., Indinger, T., Adams, N., Theissen, P. et al., "Experimental Study of On-Road Aerodynamics During Crosswind Gusts," 8th MIRA International Vehicle Aerodynamics Conference, MIRA Ltd, ISBN 978-1-906400-08-8, 2010.
- [15] Schröck, D., "Eine Methode zur Bestimmung der aerodynamischen Eigenschaften eines Fahrzeugs unter böigem Seitenwind," PhD diss., Universität Stuttgart, Stuttgart, 2011.
- [16] Lichtneger, P. and Ruck, B., "Full scale experiments on vehicle induced transient pressure loads on roadside walls," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 174:451–457, 2018, doi:[10.1016/j.jweia.2017.06.012](https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.06.012).
- [17] K.C. Ingram, "The Wind-Averaged Drag Coefficient Applied To Heavy Goods Vehicles," Supplementary Report 392, 1978.
- [18] Wojciak, J.D., "Quantitative analysis of vehicle aerodynamics during crosswind gusts," Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2012, 1st ed., Verl. Dr. Hut, München, ISBN 9783843906586, 2012.

- [19] McAuliffe, B.R. and D'Auteuil, A., "A System for Simulating Road-Representative Atmospheric Turbulence for Ground Vehicles in a Large Wind Tunnel," *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* 9(2):817–830, 2016, doi:[10.4271/2016-01-1624](https://doi.org/10.4271/2016-01-1624).
- [20] Mankowski, O., Sims-Williams, D., and Dominy, R., "A Wind Tunnel Simulation Facility for On-Road Transients," *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* 7(3):1087–1095, 2014, doi:[10.4271/2014-01-0587](https://doi.org/10.4271/2014-01-0587).
- [21] Wittmeier, F., "The Recent Upgrade of the Model Scale Wind Tunnel of University of Stuttgart," *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* 10(1):203–213, 2017, doi:[10.4271/2017-01-1527](https://doi.org/10.4271/2017-01-1527).
- [22] Stoll, D., "Ein Beitrag zur Untersuchung der aerodynamischen Eigenschaften von Fahrzeugen unter böigem Seitenwind," Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, ISBN 978-3-658-21544-6, 2018.
- [23] Yamashita, T., Makihara, T., Maeda, K., and Tadakuma, K., "Unsteady Aerodynamic Response of a Vehicle by Natural Wind Generator of a Full-Scale Wind Tunnel," *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* 10(1):358–368, 2017, doi:[10.4271/2017-01-1549](https://doi.org/10.4271/2017-01-1549).
- [24] Carlino, G., Cardano, D., and Cogotti, A., "A New Technique to Measure the Aerodynamic Response of Passenger Cars by a Continuous Flow Yawing," *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series, SAE World Congress & Exhibition, APR. 16, 2007, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2007.
- [25] Weitemeyer, S., Reinke, N., Peinke, J., and Hölling, M., "Multi-scale generation of turbulence with fractal grids and an active grid," *Fluid Dyn. Res.* 45(6):61407, 2013, doi:[10.1088/0169-5983/45/6/061407](https://doi.org/10.1088/0169-5983/45/6/061407).
- [26] Bell, J., Ehrenfried, K., and Wagner, C., "Moving-Model Analysis of the Transient Crosswind Stability of High-Speed Trains," *12th World Congress on Railway Research*, 2019.
- [27] Heine, D., Ehrenfried, K., Heine, G., and Huntgeburth, S., "Experimental and theoretical study of the pressure wave generation in railway tunnels with vented tunnel portals," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 176:290–300, 2018, doi:[10.1016/j.jweia.2018.03.020](https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.03.020).
- [28] Gaylard, A.P., Oettle, N., Gargoloff, J., and Duncan, B., "Evaluation of Non-Uniform Upstream Flow Effects on Vehicle Aerodynamics," *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* 7(2):692–702, 2014, doi:[10.4271/2014-01-0614](https://doi.org/10.4271/2014-01-0614).
- [29] Dalessio, L., Duncan, B., Chang, C., Gargoloff, J.I. et al., "Accurate Fuel Economy Prediction via a Realistic Wind Averaged Drag Coefficient," *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* 10(1):265–277, 2017, doi:[10.4271/2017-01-1535](https://doi.org/10.4271/2017-01-1535).
- [30] Theissen, P., "Unsteady vehicle aerodynamics in gusty crosswind," Zugl.: München, Techn. Univ., Diss., 2012, Strömungsmechanik, 1st ed., Dr. Hut, München, ISBN 9783843906739, 2012.
- [31] Jessing, C., Stoll, D., Kuthada, T., and Wiedemann, J., "New horizons of vehicle aerodynamics," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 231(9):1190–1202, 2017, doi:[10.1177/0954407017703245](https://doi.org/10.1177/0954407017703245).
- [32] Forbes, D.C., Page, G.J., Passmore, M.A., and Gaylard, A.P., "A Fully Coupled, 6 Degree-of-Freedom, Aerodynamic and Vehicle Handling Crosswind Simulation using the DrivAer Model," *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* 9(2):710–722, 2016, doi:[10.4271/2016-01-1601](https://doi.org/10.4271/2016-01-1601).
- [33] Carbone, L., Winkler, N., and Efraimsson, G., "Use of Full Coupling of Aerodynamics and Vehicle Dynamics for Numerical Simulation of the Crosswind Stability of Ground Vehicles," *SAE Int. J. Commer. Veh.* 9(2):359–370, 2016, doi:[10.4271/2016-01-8148](https://doi.org/10.4271/2016-01-8148).
- [34] Schito, P. and Braghin, F., "Numerical and Experimental Investigation on Vehicles in Platoon," *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series, SAE 2012 World Congress & Exhibition, APR. 24, 2012, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States:63–71, 2012.
- [35] Mosedale, A., "Anatomy of an Overtake – HPC Simulations for IndyCar," <http://rsystem-sinc.com/2019/02/anatomy-of-an-overtake-hpc-simulations-for-indycar/>, June 8, 2020.
- [36] Coleman, S.A. and Baker, C.J., "An experimental study of the aerodynamic behaviour of high sided lorries in cross winds," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 53(3):401–429, 1994, doi:[10.1016/0167-6105\(94\)90093-0](https://doi.org/10.1016/0167-6105(94)90093-0).
- [37] McAuliffe, B.R., "Improving the aerodynamic efficiency of heavy duty vehicles: wind tunnel test results of trailer-based drag-reduction technologies," Laboratory Technical Report: LTR-AL-2014-0014P, doi:[10.4224/21275397](https://doi.org/10.4224/21275397).

- [38] Hooper, J.D. and Musgrove, A.R., "Reynolds stress, mean velocity, and dynamic static pressure measurement by a four-hole pressure probe," *Experimental Thermal and Fluid Science* 15(4):375–383, 1997, doi:[10.1016/s0894-1777\(97\)00005-8](https://doi.org/10.1016/s0894-1777(97)00005-8).
- [39] Saunders, J.W. and Mansour, R.B., "On-Road and Wind Tunnel Turbulence and its Measurement Using a Four-Hole Dynamic Probe Ahead of Several Cars," *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series, SAE 2000 World Congress, MAR. 06, 2000, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2000.
- [40] Hooper, J.D. and Musgrove, A.R., "Multi-hole pressure probes for the determination of the total velocity vector in turbulent single-phase flow," in: Reizes, J.A. (ed.), *Proceedings of the 4th International Symposium on Transport Phenomena in Heat and Mass Transfer*, Sydney, Australia:1364–1374, 1991.
- [41] Bergh, H. and Tijdeman, H., "Theoretical and experimental results for the dynamic response of pressure measuring systems," *Technical report: NLR-TR F.238*, National Aerospace Laboratory, Amsterdam, 1965, doi:[10.13140/2.1.4790.1123](https://doi.org/10.13140/2.1.4790.1123).
- [42] Schröck, D., Widdecke, N., and Wiedemann, J., "The Effect of High Turbulence Intensities on Surface Pressure Fluctuations and Wake Structures of a Vehicle Model," *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* 2(1):98–110, 2009, doi:[10.4271/2009-01-0001](https://doi.org/10.4271/2009-01-0001).
- [43] Shannon, C.E., "Communication in the Presence of Noise," *Proc. IRE* 37(1):10–21, 1949, doi:[10.1109/jrproc.1949.232969](https://doi.org/10.1109/jrproc.1949.232969).
- [44] Estrada, G.E., "Das Fahrzeug als aerodynamischer Sensor," *Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart*, vol. 54, Expert-Verlag, Renningen, ISBN 978-3816930976, 2011.
- [45] Cogotti, F., Pfadenhauer, M., and Wiegand, T., "Potential of Porsche Reference Cars for Aerodynamic Development," in: Wiedemann, J. (ed.), *Progress in Vehicle Aerodynamics and Thermal Management*, Springer International Publishing, Cham, ISBN 978-3-319-67821-4:216–237, 2018.
- [46] Tran, V.T., "Determining the Wind Forces and Moments Acting on Vehicles by Means of Pressure Sensors," *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series, International Congress & Exposition, FEB. 26, 1990, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 1990.
- [47] Wagner, A., "Ein Verfahren zur Vorhersage und Bewertung der Fahrerreaktion bei Seitenwind," *Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart*, vol. 23, Expert-Verlag, Renningen, ISBN 978-3816923121, 2003.
- [48] Google (n.d.), "Google Kompassroute," [Google Maps - Wegbeschreibung der Kompassroute]. Retrieved February 11, 2019.
- [49] Deutscher Wetterdienst, "Windkarten und Winddaten für Deutschland im Bezugszeitraum 1981-2000 in 10 m über Grund," 2009.
- [50] Google (n.d.), "Google Faßberg," [Google Maps - Fliegerhorst Faßberg]. Retrieved October 15, 2019.
- [51] Mercker, E. and Cooper, K. R., "A Two-Measurement Correction for the Effects of a Pressure Gradient on Automotive, Open-Jet, Wind Tunnel Measurements," *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series, SAE 2006 World Congress & Exhibition, APR. 03, 2006, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2006.
- [52] Zhang, C., Tanneberger, M., Kuthada, T., Wittmeier, F. et al., "Introduction of the AeroSUV-A New Generic SUV Model for Aerodynamic Research," *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series, WCX SAE World Congress Experience, APR. 09, 2019, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2019.
- [53] Tanneberger, M., Zhang, C., Kuthada, T., Wittmeier, F. et al., "Development of an SUV reference model for aerodynamic research," in: Bargende, M., Reuss, H.-C., Wagner, A., and Wiedemann, J. (eds.), *19. Internationales Stuttgarter Symposium*, Proceedings, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, ISBN 978-3-658-25938-9:427–442, 2019.
- [54] Heft, A.I., Indinger, T., and Adams, N.A., "Introduction of a New Realistic Generic Car Model for Aerodynamic Investigations," *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series, SAE 2012 World Congress & Exhibition, APR. 24, 2012, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2012.

- [55] Wittmeier, F. and Kuthada, T., "Open Grille DrivAer Model - First Results," *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* 8(1):252–260, 2015, doi:[10.4271/2015-01-1553](https://doi.org/10.4271/2015-01-1553).
- [56] Blumrich, R., Widdecke, N., Wiedemann, J., Michelbach, A. et al., "New FKFS Technology at the Full-Scale Aeroacoustic Wind Tunnel of University of Stuttgart," *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* 8(1):294–305, 2015, doi:[10.4271/2015-01-1557](https://doi.org/10.4271/2015-01-1557).
- [57] Jones, W.P. and Moore, J.A., "Flow in the wake of a cascade of oscillating airfoils," *AIAA Journal* 10(12):1600–1605, 1972, doi:[10.2514/3.6692](https://doi.org/10.2514/3.6692).
- [58] Roach, P.E., "The generation of nearly isotropic turbulence by means of grids," *International Journal of Heat and Fluid Flow* 8(2):82–92, 1987, doi:[10.1016/0142-727X\(87\)90001-4](https://doi.org/10.1016/0142-727X(87)90001-4).
- [59] Hucho, W.-H., "Aerodynamik der stumpfen Körper: Physikalische Grundlagen und Anwendungen in der Praxis," Grundlagen und Fortschritte der Ingenieurwissenschaften, 2nd ed., Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, ISBN 978-3-8348-1462-3, 2012.
- [60] Irwin, H. P. A. H., Cooper, K. R., and Girard, R., "Correction of distortion effects caused by tubing systems in measurements of fluctuating pressures," *Journal of Industrial*(5):93–107, 1979.
- [61] Chen, S. and Doolen, G.D., "LATTICE BOLTZMANN METHOD FOR FLUID FLOWS," *Annu. Rev. Fluid Mech.* 30(1):329–364, 1998, doi:[10.1146/annurev.fluid.30.1.329](https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.30.1.329).
- [62] Chen, H., Teixeira, C., and Molvig, K., "Digital Physics Approach to Computational Fluid Dynamics: Some Basic Theoretical Features," *Int. J. Mod. Phys. C* 08(04):675–684, 1997, doi:[10.1142/S0129183197000576](https://doi.org/10.1142/S0129183197000576).
- [63] Kotapati, R., Keating, A., Kandasamy, S., Duncan, B. et al., "The Lattice-Boltzmann-VLES Method for Automotive Fluid Dynamics Simulation, a Review," *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series, SIAT 2009, JAN. 21, 2009, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2009.
- [64] Schütz, T., Grün, N., and Blumrich, R., "Numerische Methoden," in: Schütz, T. (ed.), *Hucho - Aerodynamik des Automobils*, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, ISBN 978-3-8348-1919-2:967–1067, 2013.
- [65] Cyr, S., Ih, K.-D., and Park, S.-H., "Accurate Reproduction of Wind-Tunnel Results with CFD," *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series, SAE 2011 World Congress & Exhibition, APR. 12, 2011, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2011.
- [66] Duncan, B.D., Kandasamy, S., Sbeih, K., Lounsbury, T.H. et al., "Further CFD Studies for Detailed Tires using Aerodynamics Simulation with Rolling Road Conditions," *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series, SAE 2010 World Congress & Exhibition, APR. 13, 2010, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2010.
- [67] Fischer, O., Kuthada, T., Wiedemann, J., Dethioux, P. et al., "CFD Validation Study for a Sedan Scale Model in an Open Jet Wind Tunnel," *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series, SAE World Congress & Exhibition, APR. 14, 2008, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2008.
- [68] Fischer, O., Kuthada, T., Mercker, E., Wiedemann, J. et al., "CFD Approach to Evaluate Wind-Tunnel and Model Setup Effects on Aerodynamic Drag and Lift for Detailed Vehicles," *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series, SAE 2010 World Congress & Exhibition, APR. 13, 2010, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2010.
- [69] John, M., Buga, S.-D., Monti, I., Kuthada, T. et al., "Experimental and Numerical Study of the DrivAer Model Aerodynamics," *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series, WCX World Congress Experience, APR. 10, 2018, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2018.
- [70] Kandasamy, S., Duncan, B., Gau, H., Maroy, F. et al., "Aerodynamic Performance Assessment of BMW Validation Models using Computational Fluid Dynamics," *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series, SAE 2012 World Congress & Exhibition, APR. 24, 2012, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2012.
- [71] Simmonds, N., Pitman, J., Tsoutsanis, P., Jenkins, K. et al., "Complete Body Aerodynamic Study of three Vehicles," *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series, WCX™ 17: SAE World Congress Experience, APR. 04, 2017, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2017.

- [72] Dassault Systèmes, “SIMULIA® PowerFLOW® Best Practices Guide for External Aerodynamics 5.5 BP: Revision 1,” 2018.
- [73] D’Hooge, A., Palin, R., Rebbeck, L., Gargoloff, J. et al., “Alternative Simulation Methods for Assessing Aerodynamic Drag in Realistic Crosswind,” *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* 7(2):617–625, 2014, doi:[10.4271/2014-01-0599](https://doi.org/10.4271/2014-01-0599).
- [74] Weinman, K.A., Fragner, M., Deiterding, R., Heine, D. et al., “Assessment of the mesh refinement influence on the computed flow-fields about a model train in comparison with wind tunnel measurements,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 179:102–117, 2018, doi:[10.1016/j.jweia.2018.05.005](https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.05.005).
- [75] Menter, F.R. and Kuntz, M. and Langtry, R., “Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model,” *Turbulence, Heat and Mass Transfer* 4(4), 2003.
- [76] Spalart, P.R., Deck, S., Shur, M.L., Squires, K.D. et al., “A New Version of Detached-eddy Simulation, Resistant to Ambiguous Grid Densities,” *Theoret. Comput. Fluid Dynamics* 20(3):181–195, 2006, doi:[10.1007/s00162-006-0015-0](https://doi.org/10.1007/s00162-006-0015-0).
- [77] Gritskevich, M.S., Garbaruk, A.V., Schütze, J., and Menter, F.R., “Development of DDES and IDDES Formulations for the $k-\omega$ Shear Stress Transport Model,” *Flow Turbulence Combust* 88(3):431–449, 2012, doi:[10.1007/s10494-011-9378-4](https://doi.org/10.1007/s10494-011-9378-4).
- [78] Wilcox, D.C., “Turbulence modeling for CFD,” 3rd ed., DCW Industries, La Cañada, Calif., ISBN 9781928729082, 2010.
- [79] Wendland, H., “Scattered data approximation,” Cambridge monographs on applied and computational mathematics, vol. 17, Cambridge University Press, Cambridge, ISBN 9780521843355, 2005.
- [80] Lovejoy, S. and Schertzer, D., “The Weather and Climate: Emergent Laws and Multifractal Cascades,” Cambridge University Press, Cambridge, ISBN 9781107018983, 2013.
- [81] Kremheller, A., “Aerodynamic Interaction Effects and Surface Pressure Distribution during On-Road Driving Events,” *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* 8(1):165–176, 2015, doi:[10.4271/2015-01-1527](https://doi.org/10.4271/2015-01-1527).
- [82] Wilhelmi, H., Jessing, C., Bell, J., Heine, D. et al., “Aerodynamic Characterisation of a Compact Car Overtaking a Heavy Vehicle,” in: Dillmann, A., Heller, G., Krämer, E., Wagner, C. et al. (eds.), *New Results in Numerical and Experimental Fluid Mechanics XII*, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, Springer International Publishing, Cham, ISBN 978-3-030-25252-6:794–804, 2020.
- [83] Volpe, R., Ferrand, V., Da Silva, A., and Le Moyne, L., “Forces and flow structures evolution on a car body in a sudden crosswind,” *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 128:114–125, 2014, doi:[10.1016/j.jweia.2014.03.006](https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.03.006).
- [84] Chadwick, A., Garry, K., and Howell, J., “Transient Aerodynamic Characteristics of Simple Vehicle Shapes by the Measurement of Surface Pressures,” *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series, SAE 2000 World Congress, MAR. 06, 2000, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2000.
- [85] Ryan, A. and Dominy, R.G., “The Aerodynamic Forces Induced on a Passenger Vehicle in Response to a Transient Cross-Wind Gust at a Relative Incidence of 30° ,” *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series, International Congress & Exposition, FEB. 23, 1998, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 1998.
- [86] Ryan, A. and Dominy, R.G., “Wake Surveys Behind a Passenger Car Subjected to a Transient Cross-Wind Gust,” *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series, SAE 2000 World Congress, MAR. 06, 2000, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2000.
- [87] Theissen, P., Wojciak, J., Heuler, K., Demuth, R. et al., “Experimental Investigation of Unsteady Vehicle Aerodynamics under Time-Dependent Flow Conditions - Part 1,” *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series, SAE 2011 World Congress & Exhibition, APR. 12, 2011, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2011.
- [88] Wojciak, J., Theissen, P., Heuler, K., Indinger, T. et al., “Experimental Investigation of Unsteady Vehicle Aerodynamics under Time-Dependent Flow Conditions - Part2,” *SAE Technical Paper Series*, SAE Technical Paper Series, SAE 2011 World Congress & Exhibition, APR. 12, 2011, SAE International400 Commonwealth Drive, Warrendale, PA, United States, 2011.

- [89] Merker, E., "On buoyancy and wake distortion in test sections of automotive wind tunnels," in: *Wiedemann, J. (ed.) Proceedings of the 9th FKFS-Conference on Progress in Vehicle Aerodynamics and Thermal Management, Stuttgart, 2013.*
- [90] Karimipناه, T., Sandberg, M., and Awbi, H.A., "Turbulent jets in confined spaces: Application in mixing ventilation: experimental and numerical studies," KTH Royal Institute of Technology, Stockholm, ISBN 91-7170-667-4, 1996.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Übersicht des in 3 Phasen unterteilten Forschungsprojekts.	2
Abbildung 2-1:	Definition der relevanten Geschwindigkeiten und des Fahrzeugkoordinatensystems [2].	3
Abbildung 3-1:	Verteilung der Turbulenzintensitäten („turbulence intensity“) und integralen Längenskalen („AC length scale“) in den unterschiedlichen Raumrichtungen (u, v, w) für unterschiedliche Verkehrs- und Geländesituationen [10].	9
Abbildung 3-2:	Strömungslinien und Geschwindigkeitsbeträge um ein Fahrzeug in einer Windkanalumgebung mit FKFS swing® [31].	11
Abbildung 4-1:	Positionierung der Vierloch-Strömungssonden, der Abstandssensoren zu Bestimmung der Fahrzeuglage und des optischen Sensors zur Bestimmung der Geschwindigkeit über Grund am Versuchsfahrzeug [2].	14
Abbildung 4-2:	Verteilung der Oberflächendruckmessstellen auf dem Versuchsfahrzeug [2].	14
Abbildung 4-3:	Versuchsfahrzeug bei der Kalibrierung im Aeroakustik-Windkanal der Universität Stuttgart (links) und die bei der Vorderwagen-Kalibrierung verwendeten Oberflächendruckmessstellen (rechts) [2].	15
Abbildung 4-4:	Versuchsfahrzeug mit 1 m vor der Front montiertem 2D-Array – bestehend aus 11 Fünflochsonden.	16
Abbildung 4-5:	Messpositionen der Fünflochsonden am Array vor dem Fahrzeug für die Versuche auf den Teststrecken.	17
Abbildung 4-6:	Die in Süddeutschland gelegene und in Stuttgart beginnende Kompassroute mit eingezeichneter Fahrtrichtung und die Lage der berücksichtigten Wetterstationen der vier markierten Flughäfen [48].	18
Abbildung 4-7:	Windkarte – Windgeschwindigkeiten in der Bundesrepublik Deutschland 10 m über Grund im Jahresmittel, Bezugszeitraum 1981 – 2000 [49].	18
Abbildung 4-8:	Satellitenansicht der als Teststrecke genutzten Landebahn mit den zugehörigen Rollwegen beim DLR Trauen mit einer Länge von 3 km und 25 m Breite sowie mindestens 200 m direkt angrenzendem flachen Rasenbewuchs [50].	19
Abbildung 4-9:	Seitenwindanlage der BMW-Teststrecke Aschheim: Skizze der Anlage mit Versuchsfahrzeug (oben links), Anlage mit Beschleunigungsstrecke und angrenzender Baumreihe (oben rechts) und Seitenansicht des 30 m langen Seitenwindbereichs mit 10 Einzelgebläsen (unten) mit seitlich angrenzendem Baumbewuchs.	20
Abbildung 4-10:	Hinterherfahrt des Versuchsfahrzeugs mit einem Abstand von 10 m zum Transporter mit Kofferaufbau.	21
Abbildung 4-11:	Überholmanöver von einem Transporter mit Kofferbau auf der linken Spur.	22
Abbildung 4-12:	Versuchsfahrzeug vor der Seitenwindanlage (BMW Aschheim).	22
Abbildung 4-13:	FAT Golf Fahrzeugmodell im Maßstab 1:4 im Modellwindkanal der Universität Stuttgart mit 5-Band-System und FKFS swing® in der Düsenaustrittsebene.	23
Abbildung 4-14:	Detailansicht der in der Simulation verwendeten Geometrien des geschlossenen Vorderwagens des VW Golf VII (links) und des vereinfachten Rades mit detaillierter Radkappe (rechts).	24
Abbildung 4-15:	Aufbau des FAT Golf 1:4 Fahrzeugmodells auf der Aluminium-Grundplatte mit Schwellerstützen- und Radaufnahmen; Außenhaut, Unterboden und Anbauteile aus dem 3D-Drucker.	25

Abbildung 4-16: Verschiedene Ansichten des AeroSUV im Modellwindkanal der Universität Stuttgart (links) und die Verteilung der Oberflächendruckmessstellen auf dem Fahrzeugmodell (rechts).	25
Abbildung 4-17: Versuchsfahrzeug VW Golf VII im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal der Universität Stuttgart mit 5-Bandsystem und FKFS swing® in der Düsenaustrittsebene.	26
Abbildung 4-18: Links: Größe und Position der Flügel und Flaps im Windkanal mit neutralen (blau) und angewinkelten (blau) Flaps. Rechts: Klappensystem in der Messstrecke nahe des Düseneinlasses.	27
Abbildung 4-19: Zusammenhang zwischen dem Strömungs- und dem Flapwinkel β_{flap} bei 10 Hz (links) bzw. der Flapfrequenz f_{flap} bei einer Amplitude von 10° (rechts) nahe der Fahrzeugposition in leerer Messstrecke.	28
Abbildung 4-20: Ansicht stromabwärts in die Messstrecke mit den großen passiven Turbulenzgeneratoren (grüne Elemente) am Düsenauslass und dem aktiven Klappensystem dahinter.	28
Abbildung 4-21: Breite der quadratischen Zylinder quer zur Strömungsrichtung und Verteilung der Zylinder über die Breite der Teststrecke für den kleinen (oben) und den großen (unten) Turbulenzgenerator (Anströmrichtung von unten nach oben). Unten: Montierte Platte vor den Zylindern zur Erhöhung der Breite der Turbulenzgeneratoren.	29
Abbildung 4-22: Links: 1:4-Modell des Versuchsfahrzeugs der SWG mit Laufband und Modellhalterung am Dach. Rechts: Detaillierter Unterboden des Fahrzeugmodells.	30
Abbildung 4-23: Positionierung der Fünflochsonden vor dem Modell und in der Breite bei $z = 0,125$ m.	31
Abbildung 4-24: Skizze der Tunnelsimulationsanlage des DLR Göttingen mit den 5 verschiedenen Bereichen der 60 m langen Anlage.	31
Abbildung 4-25: Automobilkonfiguration der TSG: a, d) maßstabsgetreues Fahrzeugmodell, das auf dem Modellträger montiert ist; b, e) Seitenwindmodul; c, f) Bodenplatte im Seitenwindtestabschnitt.	33
Abbildung 4-26: Simulationsbox mit Einlass (rot), Auslass (dunkelblau), Decke (hellblau), Boden reibungsfrei (dunkelgrau), Laufband mit $v = v_F$ (orange) und Fahrzeug (hellgrau) für Simulia PowerFLOW® (links); Netzverfeinerungen (VR-Regionen) eins bis fünf im Simulationsvolumen (rechts).	35
Abbildung 4-27: Netzverfeinerungen VR 6 bis 10 nach Simulia PowerFLOW® Best Practices Guide [72] um das Fahrzeug in Simulia PowerFLOW® mit einer *Aufweitung VR 6 & 7 von 10° in der xy-Ebene.	35
Abbildung 4-28: Prinzipskizze der gleichförmigen instationären Anströmung.	36
Abbildung 4-29: Strömungsgeschwindigkeit der verteilt instationären Anströmung für verschiedene Anströmbedingungen; stationäre Anströmung - Windkanal (links), Wind - Konstantfahrt auf der Teststrecke (Mitte) und Wind & Verkehr - Hinterherfahrt auf der Teststrecke nach [72].	37
Abbildung 4-30: Die Verfeinerung in Wandnormalenrichtung ist in dieser Abbildung dargestellt. Die obere Grenze des Bereichs Δ_3 geht in einen volumetrischen Verfeinerungsbereich über. Stimmen diese beiden Verfeinerungsebenen nicht überein, werden die Verfeinerungsebenen von Δ_3 nach außen verlaufend allmählich zusammengeführt.	40
Abbildung 4-31: Darstellung der zonenbezogenen Verfeinerungsbereiche auf der Symmetrieachse ($y = 0$ m) und in der x-z-Ebene. R1 (Anströmung, VR4), R2 (Front und mittlerer Bereich, VR5), R3 (direkter Nachlauf, VR4), R4 (entfernter Nachlauf, VR3).	40

Abbildung 4-32:	Links: Der Kern entspricht dem HF-Bereich, der innerhalb des Außengebiets der atmosphärischen Grenzschicht liegt. Das Wachstum des inneren Kerns wird durch Anpassung von dy/dx an gemessene Wachstumsraten einer Mischschicht bestimmt. Rechts: Ablaufdiagramm, das die Festlegung der Einströmgrenze zeigt. Der Aufbau der Geschwindigkeitsfelder für HF und KF erfolgt unabhängig, basierend auf den Messungen der Fahrversuche. Die Geschwindigkeitsfelder werden dann im Grenzgebiet über eine Gewichtungsfunktion W zusammengeführt. ...	42
Abbildung 4-33:	Die Abbildung zeigt die u -Komponente des Geschwindigkeitsfeldes (links) und die v -Komponente des Geschwindigkeitsfeldes (rechts) an der Strömungsgrenze. Der HF-Bereich wird durch den in beiden Abbildungen dargestellten rechteckigen Bereich begrenzt.	43
Abbildung 4-34:	Blick auf die Rechendomäne für die Windkanalberechnungen: 1. Einlassebene an der Düse, 2. Klappensystem, 3. Band mit Grenzschichtabsaugung, 4. Öffnung für Druckausgleich, 5. Auslassebene, 6. Plenum.	44
Abbildung 4-35:	Die Abbildung zeigt für die v -Komponente der Geschwindigkeit eine gute Übereinstimmung zwischen dem gemessenen und dem berechneten Feld in der Ebene des Messarrays.	45
Abbildung 5-1:	Histogramm und die zugehörige Normalverteilung der Anströmwinkel bei einer Fahrgeschwindigkeit von $v_F = 27,8$ m/s der vier Kompassfahrten.	46
Abbildung 5-2:	Normalverteilungen für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten der Kompassfahrten (links) und für die verschiedenen Verkehrsdichten bei einer Fahrgeschwindigkeit von $v_F = 27,8$ m/s (rechts).	47
Abbildung 5-3:	Histogramm des Geschwindigkeitsverhältnis bei $v_F = 27,8$ m/s des gesamten Kollektivs (links) und die aus den Normalverteilungen resultierenden Mittelwerte und Standardabweichungen für die vier Fahrgeschwindigkeiten (rechts).	49
Abbildung 5-4:	Turbulenzintensität und integrales Längenmaß der Kompassfahrt und deren Häufigkeit für die x -Richtung (links) und die y -Richtung (rechts).	50
Abbildung 5-5:	Verteilung des mittleren Druckbeiwerts c_p auf der Fahrzeugoberfläche des Versuchsfahrzeugs der Kompassfahrten für eine Fahrgeschwindigkeit von $v_F = 27,8$ m/s aus der Vorder- (links) und Rückansicht (rechts) die schwarzen Punkte markieren die Positionen der Messstellen auf der Fahrzeugoberfläche.	51
Abbildung 5-6:	Verteilung der mittleren Schwankung des Druckbeiwerts $c_{p,rms}$ auf der Fahrzeugoberfläche des Versuchsfahrzeugs der Kompassfahrten für eine Fahrgeschwindigkeit von $v_F = 27,8$ m/s aus der Vorder- (links) und Rückansicht (rechts) die schwarzen Punkte markieren die Positionen der Messstellen auf der Fahrzeugoberfläche.	51
Abbildung 5-7:	Mittlere Druckbeiwerte und deren Schwankung entlang des Mittelschnitts der Fahrzeug-motorhaube und des -dachs (links) und im Mittelschnitt des Fahrzeughecks (rechts) bei $v_F = 27,8$ m/s.	52
Abbildung 5-8:	Mittlere Druckbeiwerte und deren Schwankung für den z -Schnitt (220 mm) an der Fahrzeugfront (links) und den z -Schnitt (440 mm) am Fahrzeugheck (rechts) bei $v_F = 27,8$ m/s.	53
Abbildung 5-9:	Verhältnis der Turbulenzintensitäten Tu zu den integralen Längenmaßen L für die verschiedenen Geschwindigkeitskomponenten für die Konstant- und Hinterherfahrt bei unterschiedlichen Abständen mit $v_F = 27,8$ m/s.	55
Abbildung 5-10:	Links: Gegenüberstellung der Turbulenzintensitäten in die unterschiedlichen Raumrichtungen bezogen auf die Gesamtturbulenzintensität. Rechts: Turbulenzintensitäten in die unterschiedlichen Raumrichtungen im Verhältnis zur Turbulenzintensität in Fahrtrichtung bei unterschiedlichen Fahrzeugabständen. Zusätzlich rechts dargestellt: Verhältnisse der Turbulenzintensitäten aus den Straßenversuchen von Wordley [10] und McAuliffe [12].	56

Abbildung 5-11: Verteilung der Turbulenzintensitäten an den Sonden des Arrays bei $z = 0,5$ m in den Raumrichtungen bei unterschiedlichen Abständen für die Hinterher- und die Konstantfahrt.	57
Abbildung 5-12: Verteilung der Turbulenzintensitäten Tu_x (links), Tu_y (mittig) und Tu_z (rechts) in vertikaler z-Richtung an den Sonden des Arrays bei $y = 0$ m für unterschiedliche Fahrabstände bei den Hinterher- und Konstantfahrten.....	57
Abbildung 5-13: Übersicht der Veränderung des Geschwindigkeitsverhältnisses zwischen der Fahrgeschwindigkeit v_F und der Anströmgeschwindigkeit v_A sowie der Standardabweichung von $\sigma(v_A)$ für unterschiedliche Abstände bei der Hinterher- und Konstantfahrt mit $27,8$ m/s.....	58
Abbildung 5-14: Zeitliche Verläufe der Geschwindigkeitskomponenten am Fahrzeugarray in $z = 0,5$ m für die Konstant- (oben) sowie die Hinterherfahrten bei 50 m (mittig) und 10 m (unten) Abstand mit $27,8$ m/s.....	59
Abbildung 5-15: Instationäres Geschwindigkeitsfeld der Schwankungen v' an der unteren Sondenreihe des Fahrzeugarrays. Für jede Sondenposition sind die Abweichungen in der Quergeschwindigkeit vom zeitlichen Mittelwert an der jeweiligen Sonde dargestellt. Die Zwischenbereiche wurden linear interpoliert. Von links nach rechts sind zunächst die Konstant- und dann die Hinterherfahrt mit abnehmenden Abständen (von 100 m - 10 m) bei $v_F = 100$ km/h dargestellt.	60
Abbildung 5-16: Spektren der Geschwindigkeitskomponenten (von links nach rechts: u, v, w) für die Konstant- und Hinterherfahrten für die mittlere Sonde in $0,5$ m Höhe bei einer Geschwindigkeit von $27,8$ m/s.....	61
Abbildung 5-17: Korrelationskoeffizienten der Zeitsignale für die Geschwindigkeitskomponenten am 2D-Array ($z = 0,5$ m) in Relation zur Referenzsonde 1 (links). Nummerierung aufsteigend von links nach rechts. Spalten: KF, HF 50 m, HF 10 m. Reihen: Geschwindigkeitskomponenten u' , v' , w'	64
Abbildung 5-18: Verteilung der Druckbeiwerte und ihrer Schwankung für die Konstant- und Hinterherfahrt entlang der Fahrzeugmitte (links) sowie entlang der Motorhaube und des Dachs und am Heck (rechts) bei $v_F = 27,8$ m/s.....	65
Abbildung 5-19: Verteilung der Druckbeiwerte und ihrer Schwankung für die Konstant- und Hinterherfahrt entlang der Fahrzeugfront (links) und entlang des Hecks (rechts) bei $v_F = 27,8$ m/s.	66
Abbildung 5-20: Vergleich der Druckschwankungen am Fahrzeugarray an der Fahrzeugfront (oben), an der Dachmittellinie (Mitte) und am Heck (unten) für die Konstant- (links) und Hinterherfahrten mit 50 m (Mitte) bzw. 10 m (rechts) Fahrzeugabstand bei einer Geschwindigkeit von $v_F = 27,8$ m/s.	67
Abbildung 5-21: Mittlere Turbulenzintensitäten Tu_x (links) und Tu_y (rechts) über den zugehörigen integralen Längenmaßen für die Hinterherfahrt bei verschiedenen Abständen sowie der Konstantfahrt mit $v_F = 27,8$ m/s.....	68
Abbildung 5-22: Darstellung des instationären Verlaufs der Geschwindigkeitskomponenten am Array (von oben nach unten: u/v_F , v/v_F , w/v_F) für ein Überholmanöver auf der Teststrecke für unterschiedliche y-Positionen.....	70
Abbildung 5-23: Räumliche Darstellung der Geschwindigkeitskomponenten in der Anströmung am Array über die Fahrzeugbreite für das Überholmanöver eines Transporters. Markierungen: Unterteilung in die unterschiedlichen Phasen des Überholmanövers.	72
Abbildung 5-24: Entwicklung der Druckschwankungen während eines Überholmanövers an der Fahrzeugfront (oben), entlang der Mittellinie (Mitte) und am Fahrzeugheck (unten).....	74
Abbildung 5-25: Verteilung der Schwankung des Druckbeiwerts c_p' über Fahrzeugfront (oben) und - heck (unten) für ein Überholmanöver in Abhängigkeit vom Abstand.	75

Abbildung 5-26: Verläufe der Geschwindigkeitskomponenten u , v und w an der mittleren Sonde des Arrays für 5 Wiederholungen (farbige Kurven) des Überholmanövers. Für diese Fahrten ist der Ensemblemittelwert geplottet (schwarz).	76
Abbildung 5-27: Laufende Turbulenzintensitäten über ein Zeitfenster von 1 s in Abhängigkeit vom Fahrzeugabstand an der mittleren Sonde des Arrays für 5 Versuchsfahrten (farbige Kurven) des Überholmanövers. Schwarz dargestellt: Ensemblemittelwert der Turbulenzintensitäten aus Versuchsfahrten. Symbole: Vergleichswerte aus Versuchen mit versetzt fahrendem Fahrzeug (linken Spur) bei konstantem Abstand zwischen den Fahrzeugen mit $v_F = 22,2$ m/s (\square); $27,8$ m/s (\circ) und $33,3$ m/s (\diamond).....	78
Abbildung 5-28: a) Relativer Anstellwinkel, β , Böenprofile entlang der Seitenwindanlage, b) Scherschichtprofil für einen relativen Anstellwinkel von $\beta = 30^\circ$	79
Abbildung 5-29: Zeitlich gemittelter Oberflächendruck (a, b, c) und maximale Änderung des Drucks (d, e, f) unter Seitenwindeinfluss für $\beta = 0; 22; 25; 30; 35; 45^\circ$ für die vordere Stoßstange (a, d), die Mittellinie über Motorhaube, Dach und Heck ($y = 0$ m) (b, e) und die hintere Stoßstange (c, f).	80
Abbildung 5-30: Instationärer Oberflächendruck für den Fall $\beta = 30^\circ$. a) vordere Stoßstange (dunkel – hell = luvseitig – leeseitig), b) Mittellinie (dunkel – hell = vorne – hinten), c) hintere Stoßstange (dunkel – hell = luvseitig – leeseitig).	81
Abbildung 5-31: Druckschwankungen an der a) Luvseite (F_{ww}) der vorderen Stoßstange, b) Mitte (F_c) der vorderen Stoßstange, c) Leeseite (F_{LW}) der vorderen Stoßstange, d) Dachmittellinie (C_T), e) Heckmitte R_c für alle Anstellwinkel.	81
Abbildung 5-32: Instationärer Druck an der vorderen Stoßstange für a) $\beta = 22^\circ$, b) $\beta = 25^\circ$, c) $\beta = 30^\circ$, d) $\beta = 35^\circ$ und e) $\beta = 45^\circ$	83
Abbildung 5-33: Instationärer Druck an der hinteren Stoßstange für a) $\beta = 22^\circ$, b) $\beta = 25^\circ$, c) $\beta = 30^\circ$, d) $\beta = 35^\circ$ und e) $\beta = 45^\circ$	83
Abbildung 5-34: Druckpositionen, Normalvektoren und resultierende Kraft- und Momentberechnungen für die Anstellbedingungen a) $\beta = 0^\circ$ und b) $\beta = 30^\circ$	84
Abbildung 5-35: Aus den Druckmessungen berechneter a) instationärer Strömungswiderstand und b) Seitenkraft.....	84
Abbildung 6-1: Statische Turbulenzerzeuger im Modellwindkanal der Universität Stuttgart – (1) Gitter; (2) Gitter mit Staugitter; (3) Gitter mit Lochblech; (4) TE-150 in der Düsenvorkammer; (5) TE-300 in der Düsenvorkammer.	86
Abbildung 6-2: Turbulenzintensität (links) und integrales Längenmaß (rechts) der statischen Turbulenzerzeuger in alle Raumrichtungen in der leeren Messstrecke bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 50 m/s an der Position 800/0/125 mm; turbulente Größen der Fahrversuche sind mit gestrichelten Linien im Diagramm dargestellt.	86
Abbildung 6-3: Geschwindigkeitsverhältnisse der Hinterherfahrt auf der Teststrecke (TS-HF) in verschiedenen Abständen und der stationären Turbulenzerzeuger im Modellwindkanal (MWK-V2 / MWK-V3).	87
Abbildung 6-4: Spektrale Leistungsdichte der statischen Turbulenzerzeuger in die drei Raumrichtungen (von links nach rechts – x, y, z) in der leeren Messstrecke an der Position 800/0/125 mm.	88
Abbildung 6-5: Mittlere Druckbeiwerte und deren Schwankung entlang des Mittelschnitts der Fahrzeug-motorhaube und des -dachs (links) und im z-Schnitt der Fahrzeugfront (rechts) im Modellwindkanal mit verschiedenen statischen Turbulenzgeneratoren.	88
Abbildung 6-6: Signale aus den Fahrversuchen auf der Teststrecke (links) und generische Signale zur Nachbildung der Straßenfahrt (rechts) zur Anregung der Strömung mit FKFS swing [®]	89

Abbildung 6-7:	Turbulenzintensität über integralem Längenmaß in x-Richtung (links) und y-Richtung (rechts) verschiedener Signale mit FKFS swing® in 0,25 m Entfernung vor dem FAT Golf 1:4 bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 50 m/s an der Position 800/0/125 mm; Zielwerte der Fahrversuche sind mit gestrichelten Kreisen dargestellt.	90
Abbildung 6-8:	Mittlere Druckbeiwerte und deren Schwankung entlang des Mittelschnitts der Fahrzeug-motorhaube und des -dachs (links) und im z-Schnitt der Fahrzeugfront (rechts) im Modellwindkanal unter stationärer Anströmung (Referenz) und verschiedenen instationären Anströmungen.....	91
Abbildung 6-9:	Mittlere Druckbeiwerte und deren Schwankung entlang des Mittelschnitts der Fahrzeug-motorhaube und des -dachs (links) und in der z-Ebene (55 mm) an der Fahrzeugfront (rechts) im Modellwindkanal unter stationärer Anströmung (Referenz) und verschiedenen instationären Anströmungen.....	92
Abbildung 6-10:	Fotografie der Turbulenzerzeuger TE-300 in der Düsenvorkammer des Modellwindkanals, Prinzipskizze der TE-300 und der Kombination aus TE-300 und FKFS swing®.	92
Abbildung 6-11:	Turbulenzintensität über integralem Längenmaß in x-Richtung (links) und y-Richtung (rechts) der Kombination aus statischem TE-300 mit FKFS swing unter verschiedenen Signale in 0,25 m Entfernung vor dem FAT Golf 1:4 bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 50 m/s an der Position 800/0/125 mm; Zielwerte der Fahrversuche sind mit gestrichelten Kreisen dargestellt.....	93
Abbildung 6-12:	Mittlere Druckbeiwerte und deren Schwankung entlang des Mittelschnitts der Fahrzeug-motorhaube und des -dachs (links) und in der z-Ebene (55 mm) an der Fahrzeugfront (rechts) im Modellwindkanal unter stationärer Anströmung (Referenz) und verschiedenen instationären Anströmungen in Kombination mit dem statischen Turbulenzerzeuger TE-300 bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 50 m/s.....	93
Abbildung 6-13:	Vergleich der aerodynamischen Beiwerte des Versuchsfahrzeugs ohne Kühlluft im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal (FWK) und des FAT Golf 1:4 Fahrzeugmodells im Modellwindkanal (MWK).	95
Abbildung 6-14:	Detailansicht der Geometrie des FAT Golf (links) und des VW Golf (rechts) im Bereich des Unterboden und der Räder.	96
Abbildung 6-15:	Detailansicht und Benennung der Varianten der Fahrzeuggeometrie im Windkanal. ...	96
Abbildung 6-16:	Vergleich der Luftwiderstandsbeiwerte der Fahrzeugmodelle FAT Golf (oben/blau) und VW Golf (unten/grau) ohne Kühlluft im Modellwindkanal bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 50 m/s mit FKFS swing® und dem Signal HF1z1 für verschiedene Variationen der Fahrzeuggeometrie.....	97
Abbildung 6-17:	Einfluss von Kühlluft auf den Luftwiderstandsbeiwert bei Variationen der Fahrzeuggeometrie des VW Golf 1:4 Fahrzeugmodells im Modellwindkanal bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 50 m/s mit FKFS swing® und dem Signal HF1z1.	98
Abbildung 6-18:	Beispielhafte Darstellung des Druckgradienten in der Messstrecke des Modellwindkanals ohne FKFS swing® und mit FKFS swing® und für die Signale aus den Fahrversuchen auf der Teststrecke.....	99
Abbildung 6-19:	Einfluss der Korrektur von Windkanalinterferenzeffekten auf den Luftwiderstandsbeiwert der generischen instationären Anströmung, normiert auf die stationäre Anströmung (ohne swing) bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 50 m/s.....	99
Abbildung 6-20:	Auswirkungen der instationären Anströmung auf die Luftwiderstandsbeiwerte der Variation der Fahrzeuggeometrie für die Signale aus den Fahrversuchen auf der Teststrecke (links) und die generischen Signale (rechts) bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 50 m/s.....	100

Abbildung 6-21: Vergleich der Luftwiderstandsbeiwerte mit stationärer (MWK wind averaged drag) und instationärer Anströmung der generischen Signale im Modellwindkanal (MWK instationär) normiert auf die Luftwiderstandsbeiwerte der stationären Anströmung bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 50 m/s. ...	102
Abbildung 6-22: Einfluss der Kühlluft auf die Druckbeiwerte und deren Schwankungen im Mittelschnitt des Versuchsfahrzeugs im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 27,8 m/s mit FKFS swing [®] und dem Signal SF2.9.....	103
Abbildung 6-23: Einfluss der Kühlluft auf die Druckbeiwerte und deren Schwankungen für den z-Schnitt (220 mm) an der Fahrzeugfront (links) und den z-Schnitt (440 mm) am Fahrzeugheck (rechts) des Versuchsfahrzeugs im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 27,8 m/s mit FKFS swing [®] und dem Signal SF2.9.....	104
Abbildung 6-24: Vergleich der Luftwiderstandsbeiwerte der Variation der Fahrzeuggeometrie ohne swing im Maßstab 1:1 (FWK) und Maßstab 1:4 (MWK) bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 27,8 m/s.....	105
Abbildung 6-25: Vergleich der Auswirkungen von instationärer Anströmung auf die Luftwiderstandsbeiwerte der Variation der Fahrzeuggeometrie für das KF Signal im Maßstab 1:1 (FWK) und Maßstab 1:4 (MWK) original und skaliert (links) und das HF Signal im Maßstab 1:1 (FWK) und Maßstab 1:4 (MWK) original (rechts) bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 27,8 m/s.....	106
Abbildung 6-26: Vergleich der Auswirkungen von instationärer Anströmung auf die Luftwiderstandsbeiwerte der Variation der Fahrzeuggeometrie im Maßstab 1:1 für die Signale aus den Fahrversuchen auf der Teststrecke (links) und der generischen Signale zur Nachstellung der Straßenfahrt (rechts) bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 27,8 m/s.....	106
Abbildung 6-27: Vergleich der Luftwiderstandsbeiwerte mit instationärer Anströmung der generischen Signale im Modellwindkanal (MWK) bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 50 m/s und Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal (FWK) bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 27,8 m/s normiert auf die jeweiligen Luftwiderstandsbeiwerte der stationären Anströmung.....	107
Abbildung 6-28: Spektren der Quergeschwindigkeiten in der Strömung bei sinusförmigen Anregungsfrequenzen von $5 \text{ Hz} < f_{\text{flap}} < 30 \text{ Hz}$	108
Abbildung 6-29: Turbulenzintensitäten für die freie Messstrecke in Abhängigkeit der maximalen Amplitude der Flaps (links) und Abhängigkeit der integralen Längenmaße von der Flapfrequenz bei $u_{\infty} = 30 \text{ m/s}$. Blaue Markierungen: Messwerte der x-Komponenten; orangene Markierungen: Messwerte der y-Komponenten; gestrichelte Linien: zugehörige Ausgleichskurven.	110
Abbildung 6-30: Mittlere Turbulenzintensitäten am Array für Tu_x (rote Balken) und Tu_y (blaue Balken) für eine Anregung der Strömung mit 10° und 10 Hz durch die Flaps ohne passiven Turbulenzgenerator (unten), mit dem kleinen Turbulenzgenerator (mittig) oder dem großen Turbulenzgenerator (oben) im Düsenbereich.....	111
Abbildung 6-31: Mögliche Bereiche (blau umrandete, graue Bereiche) aus Turbulenzintensitäten und integralen Längenskalen im Windkanal in x- (links) und y-Richtung (rechts) mit unterschiedlichen Kombinationen aus aktiver, sinusförmiger Anregung mittels Klappensystem und den passiven Turbulenzgeneratoren (blaue Kreuze: kein passives System, grüne Pluszeichen: kleine Turbulenzgenerator, orangene Kreise: großer Turbulenzgenerator).	112
Abbildung 6-32: Vergleich des Turbulenzintensitäten und Längenskalen in x- und y-Richtung für Straßen- (schwarze Punkte), Konstant- (schwarzer Kreis) und Hinterherfahrten (farbige Kreise) bei 27,8 m/s mit den im Windkanal (blau umrahmte Bereiche) – auf 1:1 umgerechnet – erreichten Werten.	113

Abbildung 6-33: Zeitabschnitt der Anströmwinkel β während der Hinterherfahrt auf der Teststrecke (links) und im Windkanal mit einer Anregung basierend auf der Messung auf der Teststrecke (Mitte) beziehungsweise einem generischen, sinusförmigen Anregung mit 10° und 10 Hz (rechts) für die Sonden in der Fahrzeugmitte (rot), 1 m links (blau) und 1 m rechts (gelb) von der Mitte (t^* und y^* auf 1:1 skaliert).....	114
Abbildung 6-34: Korrelationen für u (oben) und v (unten) am Array im Fall der Hinterherfahrt auf der Teststrecke (links), im Fall des nachgebildeten Signals von der Teststrecke im Windkanal (Mitte) und des generischen, sinusförmigen Anregung von 10° und 10 Hz in Windkanal (rechts) mit Sonde 1 bei $y^* = -1$ m als Referenz (t^* und y^* auf 1:1 skaliert).....	116
Abbildung 6-35: Nachbildung des Anströmwinkels für das Überholmanöver über die Zeit. Orange: Anströmwinkel $\beta_{\text{Teststrecke}}$ an der mittleren Sonde des Fahrzeugarrays (linke Achse); blau: Anströmwinkel $\beta_{\text{Windkanal}}$ an der mittleren Sonde des Arrays im Windkanal (linke Achse); grün: verwendeter Flapwinkel β_{flap} zur Simulation der Anströmung in Windkanal (rechte Achse).....	118
Abbildung 6-36: Entwicklung der Anströmwinkel während eines Überholmanövers in Querrichtung auf der Teststrecke (oben) und im Windkanal (unten, Längenmaße x^* und y^* auf die der Teststrecke skaliert) in Abhängigkeit des Abstands zum vorherfahrenden Transporter mit den 4 Phasen des Überholmanövers.....	119
Abbildung 6-37: Verteilung der Druckbeiwerte c_p (oben) und deren Schwankung $c_{p,rms}$ (unten) über die Breite der Stoßstange an der Front (links) und am Heck (rechts) für unterschiedliche Anströmbedingungen im Windkanal (farbige Verläufe) und für die Hinterherfahrt bei 50 m Abstand und einer Geschwindigkeit von $v_A = 27,8$ m/s (schwarz). y^* entspricht den auf 1:1 umgerechneten Druckpositionen in Querrichtung.....	123
Abbildung 6-38: Zeitlicher Verlauf von c_p über die Front- (oben) und Heckstoßstange (unten) am Versuchsfahrzeug für die Hinterherfahrt auf der Teststrecke (links) und am Fahrzeugmodell im Windkanal mit den Anregungen HF-Ind. (Mitte) und Sinus-Par. 10. y^* und t^* entsprechen den auf 1:1 skalierten Werten.....	125
Abbildung 6-39: Zeitliche Druckverläufe für 3 Druckbohrungen (linke Bohrung: blau; rechte Bohrung: gelb; mittlere Bohrung: grün) an der Front- und Heckstoßstange bei unterschiedlichen Anströmbedingungen (links: Hinterherfahrt auf der Teststrecke; Mitte: Anregungsform HF-Ind. im Windkanal; rechts: Anregungsform Sinus-Par. 10 im Windkanal). Die Zeit der Windkanalversuche wurde auf die Zeit der 1:1 Versuche skaliert.....	126
Abbildung 6-40: Spektrum des Drucksignals der Hinterherfahrt auf der Teststrecke (links) und der Windkanalversuche mit der Anregung HF-Ind. (Mitte) und Sinus-Par. 10 (rechts) für die linke (blau) und rechte (gelb) Seite an der Frontstoßstange und für deren Mitte (grün). (f^* : Frequenzen der Windkanalversuche auf die Frequenzen der 1:1-Versuchsbedingungen von der Teststrecke umgerechnet).....	127
Abbildung 6-41: Verlauf des Widerstandsbeiwerts c_w in Abhängigkeit vom Anströmwinkel β für statische Kraftmessungen in der SWG mit dem Klappensystem (blaue Markierungen) und Regression durch ein Polynom 2. Grades (schwarz gestrichelte Linie).....	128
Abbildung 6-42: Veränderung der Widerstandsbeiwerte gegenüber der Referenz bei unterschiedlichen Anregungsbewegungen mit dem Klappensystem.....	129
Abbildung 6-43: Veränderung der Standardabweichung für die Widerstandsbeiwerte gegenüber der Referenz bei unterschiedlichen Anregungsbewegungen mit dem Klappensystem.....	130
Abbildung 6-44: Um die Anströmgeschwindigkeit modifizierter Widerstandsbeiwert für die Anregungsformen der Referenz (oben), Sinus-Par. 10 (mittig) und HF-Ind. (unten) für die Anströmgeschwindigkeit u_∞ (rot) und eine angenommene um 10 % reduzierten Anströmgeschwindigkeit (blau) gegenüber dem Referenzwert (gestrichelte Linie).....	131

Abbildung 6-45: Auf 1:1-Maßstab angepasste Zeitabschnitte der instationären Verläufe der Widerstandsbeiwerte für die Hinterherfahrt für die Anregungsformen HF-Ind. (links), Sin-Par. 10 (mittig) und für einen aus dem Signal der Hinterherfahrt auf der Teststrecke berechneten quasi-statischen Widerstandsbeiwert (rechts).....	131
Abbildung 6-46: Zeitausschnitt vom Schwankungsfeld des Druckbeiwerts beim Überholmanöver auf der Teststrecke (oben) und beim nachgebildeten Signal im Windkanal (unten) an der vorderen Stoßstange. Die Grenzen der 4 Phasen des Überholmanövers werden durch die gestrichelten Linien markiert. Die Breite y^* und die Zeit t^* sind für die Windkanalmessungen auf 1:1 skaliert.	134
Abbildung 6-47: Zeitausschnitte der Druckschwankungen an der vorderen (links) und hinteren (rechts) Stoßstange während des Überholmanövers auf der Teststrecke (oben) und beim nachgebildeten Signal im Windkanal (unten). Farbgebung der Druckbohrungen: blau: links; grün: mittig; gelb: rechts. Gestrichelte Linien: Abgrenzung der Phasen des Überholmanövers.	135
Abbildung 6-48: Zeitlicher Verlauf der Widerstandsbeiwerte (blau, linke Achse) und der Seitenkraftbeiwerte (orange, rechte Achse) am 1:4-Modell im Windkanal für eine individuelle Klappenanregung über die Breite mit dem Signal aus dem Überholmanöver von der Teststrecke mit den 4 Phasen (Abtrennung der Phasen durch gestrichelte Linien).	137
Abbildung 6-49: Beispieldaten einer einzelnen Modellfahrt ($v_F = 35 \text{ m/s}$, $\beta = 0^\circ$), a) instationärer Druck an den 24 Positionen der Druckbohrungen, b) Beschleunigungsmesser, c) Fototransistor, d) instationärer Druck im Seitenwindbereich. e) Bezeichnung der Druckbohrungen.	139
Abbildung 6-50: Änderung des zeitlich gemittelten Drucks von $\beta = 0^\circ$ auf unterschiedliche Anstellwinkel für a) vordere Stoßstange, b) Dach und c) hintere Stoßstange.	141
Abbildung 6-51: Instationärer Druck für $v_F = 35 \text{ m/s}$, $\beta = 30^\circ$ an unterschiedlichen Druckpositionen: a) vordere Stoßstange (dunkel – hell = luvseitig - leeseitig). b) Mittellinie (dunkel - hell = Front - Heck). c) hintere Stoßstange (dunkel – hell = luvseitig - leeseitig) $v_F = 35 \text{ m/s}$, $\beta = 30^\circ$	141
Abbildung 6-52: Instationärer Oberflächendruck während des auftretenden Seitenwinds ($x = 0 \text{ m} - - 5 \text{ m}$) für unterschiedliche relative Anstellwinkel an ausgewählten Positionen: a) Luvseite der vorderen Stoßstange FWW, b) Mitte der vorderen Stoßstange FC, c) Leeseite der vorderen Stoßstange FLW, d) Dach CT, und e) Mitte der hinteren Stoßstange RC.....	142
Abbildung 6-53: Ableitung des instationären Drucks für die vordere Stoßstange für $v_F = 35 \text{ m/s}$, $\beta = 30^\circ$	142
Abbildung 6-54: Instationärer Druck auf der Leeseite der vorderen Stoßstange, F_{LW} , für 4 unterschiedliche Fahrten mit dem bewegten Modell, a) alle bei $v_F = 35 \text{ m/s}$, $\beta = 30^\circ$ und b) bei $v_F = 35; 42; 48 \text{ m/s}$, alle bei $\beta = 10^\circ$	142
Abbildung 6-55: Instationärer Druck für die Modellversuche und die Versuche mit dem Originalfahrzeug: a) vordere Stoßstange, b) Mittellinie, c) hintere Stoßstange (Positionen, siehe Abbildung 5-29).....	143
Abbildung 6-56: Modellversuch (a, c) und Versuch mit Originalfahrzeug (b, d), instationärer Druck an der vorderen Stoßstange (a, b) und an der hinteren Stoßstange (c, d).	143
Abbildung 6-57: Druckpositionen, Normalenvektoren und die daraus resultierenden Kraft- und Momentberechnungen für Anstellwinkel von a) $\beta = 0^\circ$ und b) $\beta = 30^\circ$	144
Abbildung 6-58: Instationärer Widerstand (a, b) und Seitenkraft (c, d) ausgewertet basierend auf den Druckmessungen der am DLR durchgeführten Experimente mit dem bewegten Modell (a, c) und für die auf der BMW-Teststrecke durchgeführten Experimente mit dem Originalfahrzeug (b, d).....	145

Abbildung 7-1:	Vergleich der aerodynamischen Beiwerte des Versuchsfahrzeugs ohne Kühlluft (links) im Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal (Windkanal) und der numerischen Simulation mit Simulia PowerFLOW® unter stationärer, grader Anströmung bei einer mittleren Anströmgeschwindigkeit von 27,8 m/s und Abbildungen der Versuchsfahrzeuge im Windkanal und der numerischen Simulation (rechts).	146
Abbildung 7-2:	Auswirkungen verschiedener sinusförmiger instationärer Anströmungen auf den Luftwiderstandsbeiwert, normiert auf den Luftwiderstandsbeiwert unter stationärer, grader Anströmung bei einer mittleren Anströmgeschwindigkeit von 27,8 m/s.....	147
Abbildung 7-3:	Vergleich der Luftwiderstandsbeiwerte mit instationärer Anströmung der generischen Signale im Modellwindkanal (MWK), Aeroakustik-Fahrzeugwindkanal (FWK) und Simulia PowerFLOW® (CFD) normiert auf die Luftwiderstandsbeiwerte der stationäre Anströmung.....	148
Abbildung 7-4:	Mittlere Druckbeiwerte und deren Schwankung entlang des Mittelschnitts der Fahrzeug-motorhaube und des –dachs für die gleichförmige instationäre Anströmung (links) und die verteilt instationäre Anströmung (rechts) bei einer mittleren Windgeschwindigkeit von 27,8 m/s.....	149
Abbildung 7-5:	Luftwiderstandsbeiwerte für die mit dem PowerFLOW® Turbulenzgenerator simulierte Fahrsituation der Konstantfahrt und Hinterherfahrt in 50 m Abstand zum Transporter (links) und die zugehörige Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts entlang der Fahrzeuglängsachse (rechts).	150
Abbildung 7-6:	Druckbeiwerte der Fahrzeugoberfläche an der Front für die mit dem PowerFLOW® Turbulenzgenerator simulierte Fahrsituation der Konstantfahrt und Hinterherfahrt in 50 m Abstand zum Transporter.....	151
Abbildung 7-7:	Druckbeiwerte der Fahrzeugoberfläche am Heck für die mit dem PowerFLOW® Turbulenzgenerator simulierte Fahrsituation der Konstantfahrt und Hinterherfahrt in 50 m Abstand zum Transporter.....	151
Abbildung 7-8:	Vergleich der Wirbelstärken zum Zeitpunkt t mit den mittleren Oberflächendruckbeiwert c_p für die BP-Randbedingung (links, bei $t = 2,4$ s) und HF-Randbedingung (rechts, bei $t = 2,43$ s). Die Wirbelstärkenskala gilt für beiden x-z-Ebenen und die Skala der Druckbeiwerte gilt für beide dargestellten Fahrzeugoberflächen.	154
Abbildung 7-9:	Entwicklung der Geschwindigkeitskomponente u in der Ebene der Sonden des Arrays in der Höhe $z = 0,5$ m für die Hinterherfahrt. M: Messergebnisse von der Teststrecke, C: Ergebnisse aus der CFD-Simulation.	155
Abbildung 7-10:	Oben: Mittlere u-Geschwindigkeitskomponente in der Ebene $y = 0$ m. Unten: Entwicklung der Geschwindigkeitskomponenten entlang der Linie $z = 0,5$ m in der Ebene $y = 0$ m für $t = 2.5$ s.....	157
Abbildung 7-11:	Instationärer Verlauf der Geschwindigkeitskomponenten u an der mittleren Sonde des Arrays (rote Linie: $z = 1,3$ m, blaue Linie: $z = 0,9$ m, grüne Linie: $z = 0,5$ m).	158
Abbildung 7-12:	Spektren der Geschwindigkeitskomponente u für die mittleren Sonden in 0,5 m Höhe (blau), 1,1 m Höhe (grün), und 1,7 m Höhe (rot).	158
Abbildung 7-13:	Instationärer Verlauf der Geschwindigkeitskomponente v an den mittleren Sonden des Fahrzeugarrays. Anmerkung: blaue Linie: $z = 0,5$ m, grüne Linie: $z = 0,9$ m, rote Linie: $z = 1,3$ m.....	159
Abbildung 7-14:	Spektren der Geschwindigkeitskomponente v für die mittleren Sonden in 0,5 m Höhe (blau), 0,9 m Höhe (grün) und 1,3 m Höhe (rot).	160
Abbildung 7-15:	Tu_x entlang $y = 0$ m in vertikaler Richtung für die OpenFOAM-Simulation (C – gestrichelte Linie) und die Hinterherfahrt auf der Teststrecke (M – Kreise) für die Arraysonden.....	160
Abbildung 7-16:	Vergleich der Wirbelstärken in 2 Höhen (oben: $z = 0,2$ m, unten: $z = 1,3$ m bei $t = 2,43$ s).	161

Abbildung 7-17: Verteilung der Druckbeiwerte c_p (links) und der Schwankung des Druckbeiwerts $c_{p,rms}$ (rechts) entlang der Fahrzeugfront für die Messung (M – blaue Punkte) auf der Teststrecke, die BP- (blaue Linie) und HF-Randbedingungen ($Tu_x = 2\%$: rote Linie, $Tu_x = 6\%$: grüne Linie, $Tu_x = 10\%$: lila Linie).	164
Abbildung 7-18: Verteilung der Druckbeiwerte c_p (links) und der Schwankung des Druckbeiwerts $c_{p,rms}$ (rechts) entlang der Symmetrieachse des Fahrzeugs an der Motorhaube und entlang des Daches für die Messung (M – blaue Punkte) auf der Teststrecke, die BP- (blaue Linie) und HF-Randbedingungen ($Tu_x = 2\%$: rote Linie, $Tu_x = 2\%$: grüne Linie, $Tu_x = 10\%$: lila Linie).	165
Abbildung 7-19: Vergleich Geschwindigkeitskomponente v zwischen den Messungen (M - durchgezogenen Linie) und aus den OpenFOAM-Simulationen (C – gestrichelte Linie) in den Höhen $z = 0,13$ m (grün), $z = 0,23$ m (blau) und $z = 0,33$ m bei $y = 0$ m, mit $t^* = t \cdot f$ bei einer Frequenz von $f = 10$ Hz.	168
Abbildung 7-20: Vergleich Geschwindigkeitskomponente u zwischen den Messungen (M - durchgezogenen Linie) und den OpenFOAM-Simulationen (C – gestrichelte Linie) in den Höhen $z = 0,13$ m (grün), $z = 0,23$ m (blau) und $z = 0,33$ m (rot) bei $y = 0$ m, mit $t^* = t \cdot f$ bei einer Frequenz von $f = 10$ Hz.	169
Abbildung 7-21: Verteilung der Druckbeiwerte c_p (links) und deren Schwankung $c_{p,rms}$ (rechts) über die Breite der vorderen Stoßstange für die Messung (M) im SWG und für die entsprechenden CFD-Simulationen (C).	170
Abbildung 7-22: Verteilung der Druckbeiwerte c_p (links) und deren Schwankung $c_{p,rms}$ (rechts) entlang der Fahrzeugmittellinie und Motorhaube sowie am Dach für die Messung (M) im SWG und für die zugehörigen CFD-Simulationen (C).	171
Abbildung 7-23: Wirbelverteilung in der Ebene $z = 0,2$ m über dem Kanalboden bei sinusförmiger Flapbewegung.	172

Tabellenverzeichnis

Tabelle 4-1:	Übersicht der untersuchten Parameter für die Hinterherfahrt.	21
Tabelle 4-2:	Übersicht der untersuchten Parameter für das Überholmanöver.	22
Tabelle 4-3:	Übersicht der Untersuchungsparameter an der BMW-Seitenwindanlage.	22
Tabelle 4-4:	Zusammenfassung der Gittereigenschaften, N_v : Anzahl der Kontrollvolumen, N_{wn} : Anzahl der wandnormalen Hexaeder, y^+ : dimensionsloser Wandabstand.	40
Tabelle 4-5:	Vergleich des berechneten Widerstands mit dem Ergebnis aus dem Referenzwindkanal. Anmerkung: C^* = Gesamtberechnungszeit normalisiert auf die Gesamtzeit für die stationäre Berechnung mittels MSST, n = Exponent des Berechnungszeitschrittes, der zur Aufrechterhaltung von $CFL \sim O(1)$ ($dt \sim 1^{-n}$) für alle Netzkontrollvolumen benötigt wird.	41
Tabelle 5-1:	Kategorien der Fahrgeschwindigkeiten der Straßenfahrt.	46
Tabelle 5-2:	Standardabweichungen und Mittelwerte der Normalverteilungen der Anströmwinkel für verschiedene Fahrgeschwindigkeiten der Kompassfahrten.	47
Tabelle 5-3:	Standardabweichungen und Mittelwerte der Normalverteilungen der Anströmwinkel für verschiedene Verkehrsdichten der Kompassfahrten.	48
Tabelle 5-4:	Sondenpositionen und Abstände zur Referenzsonde am Fahrzeugarray in einer Höhe von $z = 0,5$ m sowie die Farben der Verläufe in Abbildung 5-17 für die Korrelation zwischen den Signalen an der jeweiligen Sondenposition mit den Signalen der Referenzsonde.	63
Tabelle 5-5:	Übersicht der wichtigsten Zielgrößen aus den Konstant- und Hinterherfahrten auf der Teststrecke für die Windkanalversuche.	69
Tabelle 6-1:	Sondenpositionen und Abstände zur Referenzsonde 1 am Fahrzeugarray für die Versuchsfahrt und die Messungen im Windkanal. Die Abstände sind für das Array am Versuchsfahrzeug angegeben und in den Windkanalversuchen mit 1:4 skaliert gewesen. Die Farben gelten für die Verläufe der Korrelationskoeffizienten in Abbildung 6-34.	115
Tabelle 6-2:	Übersicht der näher untersuchten Anregungsfälle im Windkanal mit dem Modellfahrzeug (Maßstab 1:4). Fett und kursiv markierte Werte erreichen die Strömungseigenschaften aus der Hinterherfahrt bei einem Abstand von 50 m und einer Geschwindigkeit von 27,8 m/s auf der Teststrecke. (* - nur Kraftmessungen betrachtet).	121
Tabelle 7-1:	Vergleich der berechneten/gemessenen Mittelwerte sowie der Standardabweichungen für die Geschwindigkeitskomponenten gemittelt über die Ergebnisse an den Sondenpositionen des Arrays. $M(HF)$: Hinterherfahrt auf der Teststrecke, $C(BP)$: CFD für die BP-Randbedingung, $C(HF)$: CFD für die HF-Randbedingung bei unterschiedlichen Turbulenzintensitäten Tu_x	156
Tabelle 7-2:	Vergleich der berechneten Widerstandsbeiwerte für unterschiedliche Randbedingungen und Turbulenzintensitäten Tu_x . c_w : Mittelwert, δ : Standardabweichung $c_{w,rms}$ -Wert, t : berechnete physikalische Zeit.	163
Tabelle 7-3:	Vergleich der simulierten (C) und gemessenen (M) Statistiken für die Geschwindigkeitskomponenten. Δ : $100 M-C /u_{ref}$, mit u_{ref} als mittlere Anströmgeschwindigkeit aus den Windkanalversuchen.	167
Tabelle 7-4:	Vergleich der im Windkanal gemessenen Widerstandsbeiwerte mit den Ergebnissen der OpenFOAM-Simulationen:	170
Tabelle 7-5:	Übersicht der benötigten Rechenleistungen sowie des zugehörigen Zeitaufwands für die numerischen Arbeiten in OpenFOAM.	173

Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2014)

Nr.	Titel
263	Laserstrahlschweißen von Stahl an Aluminium mittels spektroskopischer Kontrolle der Einschweißtiefe und erhöhter Anbindungsbreite durch zweidimensional ausgeprägte Schweißnähte, 2014
264	Entwicklung von Methoden zur zuverlässigen Metamodellierung von CAE Simulations-Modellen, 2014
265	Auswirkungen alternativer Antriebskonzepte auf die Fahrdynamik von PKW, 2014
266	Entwicklung einer numerischen Methode zur Berücksichtigung stochastischer Effekte für die Crashsimulation von Punktschweißverbindungen, 2014
267	Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 1, 2014
268	Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 2, 2014
269	Schwingfestigkeitsbewertung von Schweißnahtenden MSG-geschweißter Feinblechstrukturen aus Aluminium, 2014
270	Physiologische Effekte bei PWM-gesteuerter LED-Beleuchtung im Automobil, 2015
271	Auskunft über verfügbare Parkplätze in Städten, 2015
272	Zusammenhang zwischen lokalem und globalem Behaglichkeitsempfinden: Untersuchung des Kombinationseffektes von Sitzheizung und Strahlungswärmeübertragung zur energieeffizienten Fahrzeugklimatisierung, 2015
273	UmCra - Werkstoffmodelle und Kennwertermittlung für die industrielle Anwendung der Umform- und Crash-Simulation unter Berücksichtigung der mechanischen und thermischen Vorgeschichte bei hochfesten Stählen, 2015
274	Exemplary development & validation of a practical specification language for semantic interfaces of automotive software components, 2015
275	Hochrechnung von GIDAS auf das Unfallgeschehen in Deutschland, 2015
276	Literaturanalyse und Methodenauswahl zur Gestaltung von Systemen zum hochautomatisierten Fahren, 2015
277	Modellierung der Einflüsse von Porenmorphologie auf das Versagensverhalten von Al-Druckgussteilen mit stochastischem Aspekt für durchgängige Simulation von Gießen bis Crash, 2015
278	Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen, 2015
279	Sensitivitätsanalyse rollwiderstandsrelevanter Einflussgrößen bei Nutzfahrzeugen – Teil 3, 2015
280	PCM from iGLAD database, 2015
281	Schwere Nutzfahrzeugkonfigurationen unter Einfluss realitätsnaher Anströmbedingungen, 2015
282	Studie zur Wirkung niederfrequenter magnetischer Felder in der Umwelt auf medizinische Implantate, 2015
283	Verformungs- und Versagensverhalten von Stählen für den Automobilbau unter crashartiger mehrachsiger Belastung, 2016
284	Entwicklung einer Methode zur Crashsimulation von langfaserverstärkten Thermoplast (LFT) Bauteilen auf Basis der Faserorientierung aus der Formfüllsimulation, 2016
285	Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf realer Fahrbahn, 2016

- 286 χ MCF - A Standard for Describing Connections and Joints in the Automotive Industry, 2016
- 287 Future Programming Paradigms in the Automotive Industry, 2016
- 288 Laserstrahlschweißen von anwendungsnahen Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2016
- 289 Untersuchung der Bewältigungsleistung des Fahrers von kurzfristig auftretenden Wiederübernahmesituationen nach teilautomatischem, freihändigem Fahren, 2016
- 290 Auslegung von geklebten Stahlblechstrukturen im Automobilbau für schwingende Last bei wechselnden Temperaturen unter Berücksichtigung des Versagensverhaltens, 2016
- 291 Analyse, Messung und Optimierung des Ventilationswiderstands von Pkw-Rädern, 2016
- 292 Innenhochdruckumformen laserstrahlgelöteter Tailored Hybrid Tubes aus Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2017
- 293 Filterung an Stelle von Schirmung für Hochvolt-Komponenten in Elektrofahrzeugen, 2017
- 294 Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Feinbleche aus Stahl unter kombinierter Beanspruchung, 2017
- 295 Wechselwirkungen zwischen zyklisch-mechanischen Beanspruchungen und Korrosion: Bewertung der Schädigungsäquivalenz von Kollektiv- und Signalformen unter mechanisch-korrosiven Beanspruchungsbedingungen, 2017
- 296 Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur, 2017
- 297 Analyse zum Stand und Aufzeigen von Handlungsfeldern beim vernetzten und automatisierten Fahren von Nutzfahrzeugen, 2017
- 298 Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwertes von realen Nutzfahrzeugen im Fahrversuch und Vergleich verschiedener Verfahren zur numerischen Simulation, 2017
- 299 Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen, 2017
- 300 Thermisches Rollwiderstandsmodell für Nutzfahrzeugreifen zur Prognose fahrprofilsspezifischer Energieverbräuche, 2017
- 301 The Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter in Ambient Air, 2017
- 302 Design Paradigms for Multi-Layer Time Coherency in ADAS and Automated Driving (MULTIC), 2017
- 303 Experimentelle Untersuchung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit von Scheiben auf die Kondensatbildung, 2017
- 304 Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter realen Umgebungsbedingungen, 2018
- 305 Simulationsgestützte Methodik zum Entwurf intelligenter Energiesteuerung in zukünftigen Kfz-Bordnetzen, 2018
- 306 Einfluss der Kantenbearbeitung auf die Festigkeitseigenschaften von Stahl-Feinblechen unter quasistatisch und schwingender Beanspruchung, 2018
- 307 Fahrerspezifische Aspekte beim hochautomatisierten Fahren, 2018
- 308 Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter zeitvarianten Betriebsbedingungen, 2018
- 309 Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Schraubverbindungen mit gefurchem Gewinde, 2018
- 310 Konzept zur Auslegungsmethodik zur Verhinderung des selbsttätigen Losdrehens bei Bauteilsystemen im Leichtbau, 2018
- 311 Experimentelle und numerische Identifikation der Schraubenkopfverschiebung als Eingangsgröße für eine Bewertung des selbsttätigen Losdrehens von Schraubverbindungen, 2018

- 312 Analyse der Randbedingungen und Voraussetzungen für einen automatisierten Betrieb von Nutzfahrzeugen im innerbetrieblichen Verkehr, 2018
- 313 Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von Aluminiumwerkstoffen für die Crashesimulation, 2018
- 314 Definition einer „Äquivalenten Kontakttemperatur“ als Bezugsgröße zur Bewertung der ergonomischen Qualität von kontaktbasierten Klimatisierungssystemen in Fahrzeugen, 2018
- 315 Anforderungen und Chancen für Wirtschaftsverkehre in der Stadt mit automatisiert fahrenden E-Fahrzeugen (Fokus Deutschland), 2018
- 316 MULTIC-Tooling, 2019
- 317 EPHoS: Evaluation of Programming - Models for Heterogeneous Systems, 2019
- 318 Air Quality Modelling on the Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter Concentrations Using a High-Resolution Brake Use Inventory, 2019
- 319 Dehnratenabhängiges Verformungs- und Versagensverhalten von dünnen Blechen unter Scherbelastung, 2019
- 320 Bionischer LAM-Stahlleichtbau für den Automobilbau – BioLAS, 2019
- 321 Wirkung von Systemen der aktiven, passiven und integralen Sicherheit bei Straßenverkehrsunfällen mit schweren Güterkraftfahrzeugen, 2019
- 322 Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen - Umsetzung und Anwendung, 2019
- 323 Transitionen bei Level-3-Automation: Einfluss der Verkehrsumgebung auf die Bewältigungsleistung des Fahrers während Realfahrten, 2019
- 324 Methodische Aspekte und aktuelle inhaltliche Schwerpunkte bei der Konzeption experimenteller Studien zum hochautomatisierten Fahren, 2020
- 325 Der Einfluss von Wärmeverlusten auf den Rollwiderstand von Reifen, 2020
- 326 Lebensdauerberechnung hybrider Verbindungen, 2020
- 327 Entwicklung der Verletzungsschwere bei Verkehrsunfällen in Deutschland im Kontext verschiedener AIS-Revisionen, 2020
- 328 Entwicklung einer Methodik zur Korrektur von EES-Werten, 2020
- 329 Untersuchung zu den Einsatzmöglichkeiten der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Entwicklung von 3D-Rahmenstrukturen in Crashlastfällen, 2020
- 330 Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen, 2020
- 331 Effiziente Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von LFT für Crashesimulation, 2020
- 332 Charakterisierung und Modellierung des Versagensverhaltens von Komponenten aus duktilem Gusseisen für die Crashesimulation, 2020
- 333 Charakterisierung und Meta-Modellierung von ungleichartigen Punktschweißverbindungen für die Crashesimulation, 2020
- 334 Simulationsgestützte Analyse und Bewertung der Fehlertoleranz von Kfz-Bordnetzen, 2020
- 335 Absicherung des autonomen Fahrens gegen EMV-bedingte Fehlfunktion, 2020
- 336 Auswirkung von instationären Anströmeffekten auf die Fahrzeugaerodynamik, 2020

Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 www.vda-fat.de
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2020

Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de
Twitter @VDA_online

VDA | Verband der
Automobilindustrie

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT)
Behrenstraße 35, 10117 Berlin
www.vda.de/fat

FAT | Forschungsvereinigung
Automobiltechnik