
Numerische Modellierung der Aerodynamik der PKW-LKW Überholvorgänge mittels wirbelauflösender Turbulenzmodelle

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs
(Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Lukas Kutej, M.Sc.
aus Petrvald, Tschechische Republik

Berichterstatter: apl. Prof. Dr.-Ing. habil. Suad Jakirlic
Mitberichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Jeanette Hussong
apl. Prof. Dr. rer. nat. Amsini Sadiki

Tag der Einreichung: 17. August, 2020
Tag der mündlichen Prüfung: 4. November, 2020

Darmstadt 2020

D17

Kutej, Lukas: Numerische Modellierung der Aerodynamik der PKW-LKW Überholvorgänge mittels wirbelaflösender Turbulenzmodelle
Darmstadt, Technische Universität Darmstadt,
Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUprints:2021
URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-196742
Tag der mündlichen Prüfung: 4.11.2020

Veröffentlicht unter CC BY-SA 4.0 International
<https://creativecommons.org/licenses/>

Kurzfassung

Die Überholung eines LKW von einem PKW ist aus strömungsmechanischer Sicht ein äußerst komplizierter, mit einer Reihe an Strömungserscheinungen charakterisierender Vorgang, der ohne entsprechende Vorkenntnisse nicht erfolgreich zu lösen ist. Bevor eine Strömungssimulation des Überholvorgangs durchgeführt wird, muss zuerst die Problematik der Fahrzeugumströmung verstanden und, folgend, ein numerisch relevantes Simulationsmodell ausgewählt werden. Eines der primären Ziele der vorliegenden Arbeit stellt daher die Erfassung der prädiktiven Leistungsfähigkeiten, der Glaubwürdigkeit und Zuverlässigkeit der wirbelaflösenden Modellierungsstrategie samt entsprechendem numerischen Verfahren in einer solch komplexen Strömungssituation dar.

Am Anfang der vorliegenden Arbeit wurde anhand eines vereinfachten Modells der BMW 5er Reihe im Maßstab 1:2,5 eine Gitterstudie bezüglich der Einflüsse der räumlichen und zeitlichen Auflösung auf die Ergebnisgüte durchgeführt. Im Rahmen dieser „Muss-Studie“ lässt sich relativ zügig die Empfindlichkeit der Simulationsergebnisse auf unterschiedliche Gitteranordnungen und Gittergrößen untersuchen. Die Ergebnisse werden untereinander verglichen. Anschließend wird ein geeignetes Gitter ausgewählt, das möglichst weniger Zellen beinhaltet, aber zugleich eine entsprechende Ergebnisqualität sicherstellt. Mit der resultierenden Gittereinstellung wurde anschließend ein detailliertes (unter anderem bzgl. des Unterbodens) BMW 5er Fahrzeugmodell vernetzt und simuliert.

Das im Windkanal der BMW AG durchgeführte Referenzexperiment, mit dem die Simulationsergebnisse verglichen wurden, behandelt zuerst ein isoliert stehendes PKW-Modell (1:2,5) der BMW 5er Reihe, danach aber auch einen „quasi stationären“ Überholvorgang indem acht feste Positionen des PKW relativ zu LKW abgebildet wurden. Dabei wurde eine Anströmung mit und ohne Grenzschichtabsaugung simuliert. Schließlich wurde eine Straßenmessung des Überholvorgangs mit sich bewegenden realen Fahrzeugen durchgeführt, die numerisch aber auch im Modellmaßstab nachgebildet wurde.

All diese Fälle wurden entsprechend den experimentell betätigten operativen Bedingungen numerisch simuliert. Die Grenzschichtabsaugung wird durch passende Randbedingungen dargestellt. Ein dynamischer Überholvorgang auf der Straße wird durch ein sich deformierendes und bewegendes Gitter, entsprechend der auf dem sog. „space conservation law“ basierten Methode reproduziert. Die PKW – LKW Wechselwirkung bei der statischen und dynamischen Betrachtung bringt unterschiedliche Effekte mit sich, die einen entsprechenden Einfluss auf die Luftwiderstandsbeiwerte und Momente haben, was auch näher diskutiert wurde. Numerisch wurden zwei Betrachtungen hinsichtlich des zu berücksichtigenden Strömungsgebietes verfolgt: zum einen wurde das in der Form eines regulären Hexaeders gestaltete Rechengebiet mit entsprechend definierten Einlass-, Auslass- und Symmetrierandbedingungen adoptiert und zum anderen wurde ein Rechengebiet gestaltet, das die exakte Form und die Abmessungen des Windkanals nachbildet.

Wie angedeutet stellt ein adäquates Turbulenzmodell im Rahmen eines dazu passenden Simulationsmodus einen wichtigen Teil dieser Arbeit dar. Die Arbeit an der Entwicklung der sog. hybriden RANS/LES (Reynolds-Averaged Navier-Stokes / Large-Eddy-Simulation) Modellen hat eine hohe Intensivierung in den letzten Jahren erfahren. Die im hohen Maße komplexen, die instationäre Fahrzeugaerodynamik charakterisierenden, interreagierenden strömungsmechanischen Mechanismen unter voll-turbulenten Bedingungen stellen eine hohe Anforderung an Turbulenzmodellierung. Aus diesem Grund wurde ein fortgeschrittenes, wandnahes, auf dem Konzept der Wirbelviskosität basiertes, RANS Viergleichungsmodell adoptiert, das im Rahmen der sog. wirbelaflösenden PANS Methode (Partially-Averaged Navier Stokes) die Dynamik der residualen, nicht-aufgelösten Turbulenz beschreibt. Das Modell stellt eines der Modellierungs-Highlights des auf der numerischen Methode der Kontrollvolumina basierten Codes FIRE der AVL List GmbH (Graz, Austria) mit dem alle Berechnungen durchgeführt wurden. Vergleichend dazu wurden auch reine sowohl stationäre als auch instationäre RANS Berechnungen durchgeführt.

Bei der Auswertung der Simulationsergebnisse stehen vor allem die Verteilung des Oberflächendruckes und sich daraus ergebenden aerodynamischen Kräfte im Fokus, die in der Form deren Beiwerte und wirkenden Momente dargestellt sind. Das sind die Merkmale, die das aerodynamische Verhalten der Fahrzeugkonfiguration samt der Fahrzeugstabilität am treffendsten bestimmen. Die Fähigkeit der PANS Methode, die fluktuierende Turbulenz zu einem entsprechenden Level zu erfassen, wird gegenüber den konventionellen RANS-Berechnungen auch in der Qualität der gewonnenen Ergebnisse reflektiert. Die PANS Ergebnisse zeigen ein hohes Maß an Übereinstimmung mit den experimentell ermittelten Daten. Die

Ergebnisinterpretation wird durch die Darstellung und Diskussion der momentanen und zeitlich-gemittelten Strömungsfelder (Flächen der konstanten Werte der Strömungsgrößen; Visualisierung der Wirbelstruktur durch das Q -Kriterium) in deren Gesamtheit bereichert. Die Ergebnisdarstellung wurde durch entsprechende Analysen zur Qualitätssicherung der gewonnenen Ergebnisse aus der Sicht der eigentlichen numerischen Methode (wie z.B. der Genauigkeit der räumlichen und zeitlichen Diskretisierung) sowie der korrekten Erfassung der Physik der Turbulenz (u.A., das Verhältnis der charakteristischen Gitterweite zum Kolmogorov'schen Längenmaßstab) begleitet.

Abstract

Computational modeling of the aerodynamics of the car-truck overtaking process by means of eddy-resolving turbulence models

From the fluid mechanics point of view, overtaking a truck by a car is an extremely complex process, characterized by a multiplicity of flow phenomena and cannot be successfully solved without a prior knowledge. Before a flow simulation of the overtaking maneuver is carried out, the problem of the flow around the vehicle must first be understood and, subsequently, a numerically relevant simulation model must be selected. One of the primary goals of the present work is therefore the checking of the predictive capabilities, credibility and reliability of the adopted eddy-resolving modeling strategy in connection to the corresponding numerical procedure in such a complex flow situation.

Preliminary, a grid study has been carried out by means of computing a somewhat simplified BMW 5 series car model (down-scaled to 1:2.5) regarding the effects of spatial and temporal resolution on the quality of results. As part of this "must study", the sensitivity of the simulation results to different grid arrangements and grid sizes can be examined relatively fast. The results obtained are mutually compared. A suitable grid is then selected that contains as few cells as possible, but ensuring at the same time an adequate results quality. The resulting grid setting was then adopted and a simulation accounting for a detailed BMW 5-series car geometry (among other things regarding the underbody) has been performed.

The reference experiment, carried out in the BMW AG wind tunnel, with which the simulation results have been compared, considered at first an isolated single BMW 5-series vehicle model, but then also a "quasi-stationary" overtaking process, in which eight fixed positions of the car relative to the truck were mapped. A flow was simulated with and without accounting for the boundary layer suction. Finally, a road measurement of the overtaking process with moving real vehicles was carried out, which was also numerically reproduced on a model scale.

All these cases were numerically simulated according to the experimental operating conditions. The boundary layer suction is represented by a suitable boundary condition. A dynamic overtaking maneuver on the road is reproduced by utilizing the code feature dealing with a deforming and moving grid, in accordance with the method based on the so-called "space conservation law". The car-truck interactions in the static and dynamic considerations possess different effects having a corresponding influence on the drag coefficients and moments, which was also discussed in more detail. Numerically, two considerations were pursued with regard to the flow domain to be taken into account: on the one hand, the calculation domain designed in the form of a regular hexahedron with appropriately defined inlet, outlet and symmetry boundary conditions was adopted and, on the other hand, a flow domain was designed coinciding exactly with the shape and dimensions of the wind tunnel.

As indicated above, an adequate turbulence model in the context of a suitable simulation strategy represents an important part of this work. The work on the development of the so-called hybrid RANS/LES (Reynolds-Averaged Navier-Stokes / Large-Eddy simulation) models experienced great intensification in recent years. The highly complex, interacting fluid mechanics phenomena that characterize the transient vehicle aerodynamics under fully turbulent conditions put high demands on turbulence modeling. For this reason, an advanced RANS four-equation model, based on the concept of eddy viscosity, was adopted, which describes the dynamics of the unresolved residual turbulence in the context of the so-called eddy-resolving PANS method (Partially-Averaged Navier Stokes). The model represents one of the modeling highlights of the FIRE code by the AVL List GmbH (Graz, Austria), which is based on the finite-volume numerical method, and with which all calculations were carried out. For comparison purposes, both stationary and unsteady RANS calculations were carried out.

With respect to the results evaluation, the main focus was on the distribution of the surface pressure and the resulting aerodynamic forces, which are interpreted in the form of their coefficients and acting moments. These are the properties that most directly determine the aerodynamic behavior of the vehicle configuration including vehicle stability. The capability of the PANS method in capturing the fluctuating turbulence to a corresponding level, is reflected in the quality of the results obtained, when compared to the outcome of conventional RANS calculations. The PANS results show a high degree of agreement with the experimentally determined data. The interpretation of the results is further enriched by the presentation and associated discussion of the instantaneous and time-averaged flow fields (iso-surfaces; vortex visualization through the Q criterion) in their entirety. The presentation of the results was accompanied by corresponding quality assessments with respect

to the numerical method accuracy (such as the order of the spatial and temporal discretization) as well as to the correct capturing of the physics of the turbulence (in regard, among other things, to the relationship between the characteristic grid spacing and the Kolmogorov's length scale).

Ehrenwörtliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Lukas Kutej, die vorliegende Dissertation gemäß § 22 Abs. 7 APB der TU Darmstadt ohne Hilfe Dritter und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht worden. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Datum

17. August 2020

Unterschrift:

Lukas Kutej

Danksagung

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit am Fachgebiet Strömungslehre und Aerodynamik der Technischen Universität in Darmstadt, die ich als Austauschstudent im Rahmen eines Erasmus-Programms meiner Heimatuniversität VSB – Technische Universität Ostrava in der Tschechischen Republik anfang. Besonderen Dank möchte ich an dieser Stelle allen denjenigen zum Ausdruck bringen, die mir bei der Durchführung dieser Arbeit behilflich waren.

Allen voran möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Cameron Tropea für die einmalige Gelegenheit bedanken, die er mir als Erasmus-Student gegeben hat, an seinem Fachgebiet die Arbeit durchzuführen.

Außerdem möchte ich Herrn apl. Prof. Dr.-Ing. Suad Jakirlic meinen besonderen Dank aussprechen, der mich bei meiner Dissertation unmittelbar betreut hat. Hier möchte ich seine große Unterstützung im Fachwissen hervorheben sowie das Vertrauen betonen, das er mir beim Aufbau notwendiger Hardware entgegengebracht hat. Sein freundschaftliches Auftreten und kontinuierliche Hilfsbereitschaft werden für immer in meinen Erinnerungen bleiben.

Frau Prof. Dr.-Ing. Jeanette Hussong und Herrn Prof. Dr.rer.nat. Amsini Sadiki möchte ich für die Übernahme des Koreferats herzlichst bedanken.

In meiner etwas längeren Promotionszeit habe ich mit vielen Fachgebietskollegen zu tun gehabt. An dieser Stelle möchte ich allen Mitarbeitern für die freundliche Arbeitsatmosphäre danken.

Nicht zuletzt muss ich Frau Birgit Neuthe und Frau Stephanie Lath meinen Dank äußern, die mir bei bürokratischen Angelegenheiten entgegengekommen sind und immer ein freundliches Wort für mich hatten.

Die Kollegen von der AVL List GmbH, Graz, Österreich, haben mir freundlicherweise deren numerischen Code FIRE bereitgestellt, mit dem ich meine Berechnungen durchführen konnte. Dabei gilt mein besonderer Dank Herrn Dr. Branislav Basara für viele nützliche Ratschläge im Umgang mit dem Code, Herrn Dr. Zoran Zunic als den direkten Code-Ansprechpartner für die rege Email-Kommunikation und Herrn Dipl. Ing. Wolfgang Baier für die „theoretisch unbeschränkte“ Anzahl an entsprechenden Lizenzen.

Ohne die Rechenkapazitäten des Lichtenberg Hochleistungsrechners des Hochschulrechenzentrums der Technischen Universität in Darmstadt wären die aufwendigen, zeitlich intensiven Berechnungen schwer vorstellbar. Dabei möchte ich besonders die Hilfe von der Frau Dr.-Ing. Dörte Sternel und Herrn Dr. Sergey Boldyrev erwähnen.

Meiner Mutter und in Memoriam meinem Vater danke ich für ihre Geduld und finanzielle Unterstützung während des Studiums.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung.....	I
Abstract.....	III
Ehrenwörtliche Erklärung.....	V
Danksagung.....	VII
Inhaltsverzeichnis.....	IX
Symbole und Abkürzungen.....	XI
Abbildungsverzeichnis.....	XV
Tabellenverzeichnis.....	XXIII
1. Einleitung.....	1
1.1. Einführung, Stand der Arbeiten, Motivation.....	1
1.2. Struktur der Arbeit, Vorgehensweise.....	4
2. Theoretische Grundlagen.....	7
2.1. Strömungsmechanik.....	7
2.2. Turbulenzmodellierung.....	13
2.2.1. Ein-Gleichungsmodelle.....	14
2.2.2. Zwei-Gleichungsmodelle.....	15
2.2.3. Wandbehandlung: Wandfunktionen.....	20
2.2.4. Numerische Diskretisierung.....	23
2.2.4.1. Konvektiver Fluss.....	24
2.2.4.2. Diffusiver Fluss.....	28
2.2.5. Gradienten-Approximation.....	28
2.2.6. Zeitliche Diskretisierung.....	28
2.2.7. Druckgeschwindigkeitskopplung.....	29
2.2.8. Unterrelaxation.....	31
2.2.9. Iteratives Lösungsverfahren.....	32
2.2.10. Randbedingungen.....	35
2.3. Fahrzeugumströmung.....	37
2.3.1. Fahrzeugwiderstände.....	37
2.3.2. Wirkende Kräfte und Momente.....	38
2.3.3. Strömungsablösungsarten am Fahrzeug.....	39
2.3.4. Teilwiderstände.....	40
2.3.5. Grundlagen der Windkanalmessung.....	44
3. Umströmung eines vereinfachten Fahrzeuges (<i>SingleCar</i>): Gitterstudie.....	47
3.1. Berechnungsvorbereitung.....	47
3.2. Ergebnisauswertung und Diskussion.....	52
4. Umströmung eines realistischen Fahrzeuges (<i>RealCar</i>).....	59
4.1. Berechnungsvorbereitung.....	59
4.2. Ergebnisauswertung und Diskussion.....	66
4.2.1. Strömungstechnische Auswertung.....	66
4.2.1.1. Anbringung der Räder.....	66
4.2.1.2. Einfluss der Diskretisierungsschemata.....	69
4.2.1.3. Einfluss des Windkanals und der Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i>	70
4.2.1.3.1. Verifizierung des Windkanalgitters.....	87
4.2.2. Computertechnische Auswertung.....	90
5. Quasi-stationärer PKW-LKW Überholvorgang (<i>RealCar and Truck</i>).....	95
5.1. Berechnungsvorbereitung.....	95
5.2. Ergebnisauswertung und Diskussion.....	103
5.2.1. Strömungstechnische Auswertung.....	103
5.2.1.1. Gitterstudie, Position $xL = 0,39$	103
5.2.1.2. Einfluss des Windkanals und der Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i>	106
5.2.1.3. Untersuchung einzelner Überholpositionen.....	113
5.2.2. Computertechnische Auswertung.....	148
6. Dynamischer PKW-LKW Überholvorgang (<i>RealCar and Truck – Passing</i>).....	151
6.1. Berechnungsvorbereitung.....	152
6.2. Ergebnisauswertung und Diskussion.....	154

6.2.1.	Strömungstechnische Auswertung	154
6.2.1.1.	Vorbereitungssimulationen (<i>Beginning</i>).....	155
6.2.1.2.	Überholvorgangssimulationen (<i>Manoeuvre</i>).....	157
6.2.2.	Computertechnische Auswertung	199
7.	Fazit	203
	Literaturverzeichnis.....	213
	Anhang A.....	217
	Einstellungen des Löses (<i>RealCar</i>).....	217
	Anhang B.....	227
	Einstellungen des Löses (<i>RealCar and Truck</i>).....	227
	Anhang C.....	233
	Einstellungen des Löses (<i>RealCar and Truck – Passing</i>).....	233

Symbole und Abkürzungen

Griechische Symbole:

Ausdruck	Bedeutung
Γ	Diffusionskoeffizient oder Blending-koeffizient
Γ_ε	Blending-koeffizient
Δ	Zellgröße
∇	Gradient
Λ	Kolmogorov Längenskala oder dimensionslose Länge
Ω	Querschnittverhältnis
Ω_{ij}	Drehgeschwindigkeitstensor
α	Unterrelaxationsfaktor
α^k	Koeffizient
β^k	Koeffizient
ε	Dissipation
ε_w	Dissipation an der Wand
ϵ	Iterationsfehler
ζ	Geschwindigkeitsskala
κ	Schließkonstante oder Kontraktionsverhältnis
λ	Interpolationsfaktor
λ_c	Wellenzahl
λ^*	Volumenzähigkeit bzw. Volumenviskosität
μ	Scherzähigkeit bzw. dynamische Viskosität
μ_T	Wirbelviskosität
ν	kinematische Zähigkeit bzw. kinematische Viskosität
ρ	Dichte oder Residuum
σ_ε	Schließkonstante
σ_ζ	Schließkonstante
σ_κ	Schließkonstante
τ	Zeitskala
τ_{ij}	Spannungstensor
$\bar{\tau}_{ij}$	Reynolds-Spannungstensor
τ_w	Turbulente Schubspannung an der Wand
u^2	Geschwindigkeitsskala
φ	Versperrung
ϕ, ϕ_i	Beliebige Variable
ψ	Korrelationsfaktor

Lateinische Symbole:

Ausdruck	Bedeutung
A	Projektionsfläche oder Koeffizient
A_N	Querschnittfläche des Düsenaustritts
A_P	Querschnittfläche des Plenums
A_S	Querschnittfläche des Düseneintritts
B	Schließkonstante
C_1	Schließkonstante
C_2	Schließkonstante
$C_{\varepsilon 1}$	Schließkonstante
$C_{\varepsilon 2}$	Schließkonstante
$C_{\varepsilon 2}^*$	Schließkonstante
C_η	Schließkonstante
C_μ	Schließkonstante

C_μ^ζ	Schließkonstante
C_τ	Schließkonstante
C_k	Schließkonstante
C_l	Schließkonstante
C'_2	Schließkonstante
\vec{D}	Drall
D_N	Hydraulischer Durchmesser
E	Schließkonstante
F	Fluss
\vec{F}	Kraft
I	Turbulente Intensität
\vec{I}	Impuls
H	Advektiver und viskoser Term
L	Charakteristische Länge oder Länge
K	Querschnittverhältnis
M	Menge
\vec{M}	Moment
P, P_k	Produktion der turbulenten kinetischen Energie
P_{ij}	Reibungsspannungstensor
Q	Quellterm
S	Fläche oder Quellterm
T	Temperatur oder Endzeit
U	Geschwindigkeit oder Geschwindigkeitsfeld
U_∞	Anströmgeschwindigkeit
V	Volumen oder Geschwindigkeit bzw. Geschwindigkeitsfeld
\dot{V}	Volumenstrom
W	Widerstandskraft
W_D	Druckwiderstand
W_R	Reibungswiderstand
X	Kreuzdiffusion
a_1	Interpolationsfaktor
a_2	Interpolationsfaktor
c_1	Schließkonstante
c_2	Schließkonstante
c_p	Druckbeiwert
c_w	Luftwiderstandsbeiwert
d	Richtungsvektor
f	Dämpfungsfunktion oder Integrand
f_k, f_ε	Parameter bzw. Verhältnis
f_w	Dämpfungsfunktion an der Wand
g	Totaldruck
k	Turbulente kinetische Energie
\vec{k}, k_i	Volumenkraft
l	Längenskala
l_m	Mischlänge
m	Masse
\dot{m}	Massenfluss
\vec{n}, n_i	Normalenvektor
p	Druck
p^k	Vektor der Suchrichtung
q	Quellterm
s_{ij}	Verzerrungstensor, bzw. Dehnungs- Deformationsgeschwindigkeitstensor
t	Zeit

\vec{t}	Spannungsvektor
\vec{u}, u, u_i	Geschwindigkeit bzw. Geschwindigkeitskomponente
u^+	Normierte Geschwindigkeit
\vec{v}, v	Geschwindigkeit bzw. Geschwindigkeitskomponente
w	Geschwindigkeitskomponente
\vec{x}, x_i	Ortsvektor
y^+	Dimensionsloser Wandabstand
z^k	Hilfsvektor

Abkürzungen:

Ausdruck	Bedeutung
BiCGSTAB	Biconjugate Gradients Stabilized
CDS	Central Differencing Scheme
CFD	Computational Fluid Dynamics
KV	Kontrollvolumina
LUDS	Linear Upwind Scheme
NVD	Normalized Variable Diagram
PANS	Partially-averaged Navier Stokes
PISO	Pressure Implicit with Split Operator
QUICK	Quadratic Upwind Interpolation for Convective Kinematics
RANS	Reynolds-averaged Navier Stokes
Re	Reynolds-Zahl
SIMPLE	Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations
SMART	Sharp and Monotonic Algorithm for Realistic Transport
TVD	Total Variation Diminishing
UDS	Upwind Differencing Scheme
URANS	Unsteady Reynolds-averaged Navier Stokes

Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1 Aerodynamische Faktoren. Wiederverwendung von Hucho (2005) mit Genehmigung der Springer Nature Customer Service Center GmbH. © Springer Fachmedien Wiesbaden 2005.	1
Bild 2.1: Geschwindigkeitsverteilung einer turbulenten Strömung in Wandnähe (Schäfer 2006: 268).....	20
Bild 2.2: Upwind Differencing Scheme (Jakirlic 2017b: 11)	24
Bild 2.3: Central Differencing Scheme (Jakirlic 2017b: 10)	25
Bild 2.4: Linear Upwind Scheme (Jakirlic 2017b: 13).....	25
Bild 2.5: Quadratic Upwind Differencing Scheme (Jakirlic 2017b: 13).....	26
Bild 2.6: Bezeichnung der KV, Knoten, Flächen und deren Werte (Jakirlic 2017b: 15).....	26
Bild 2.7: NVD Diagramm MINMOD Schemata (AVL 2011: 2-55)	27
Bild 2.8: NVD Diagramm SMART und AVL SMART Schemata (AVL 2011: 2-55)	27
Bild 2.9: Bezeichnung der KV- Knoten und Flächen bei Druck-Geschwindigkeitskopplung (Jakirlic 2017b: 26)	29
Bild 2.10: Multigrid – feines und grobes Gitter. Wiederverwendung von Ferziger/Peric (2002) mit Genehmigung der Springer Nature Customer Service Center GmbH. © Springer Fachmedien Wiesbaden 2002.....	34
Bild 2.11: Randbedingungen an der Wand und Symmetrieebene. Wiederverwendung von Ferziger/Peric (2002) mit Genehmigung der Springer Nature Customer Service Center GmbH. © Springer Fachmedien Wiesbaden 2002.	37
Bild 2.12: Darstellung einer Fahrzeugumströmung. Wiederverwendung von Hucho (2005) mit Genehmigung der Springer Nature Customer Service Center GmbH. © Springer Fachmedien Wiesbaden 2005.....	37
Bild 2.13: Bezugssystem mit wirkenden Kräften und Momenten. Wiederverwendung von Hucho (2005) mit Genehmigung der Springer Nature Customer Service Center GmbH. © Springer Fachmedien Wiesbaden 2005.....	39
Bild 2.14: Ablösungsgebiete an einem PKW (Mitte), Querwirbel (links) a) nichtperiodisch, b) periodisch, c) ringförmig, Längswirbel (rechts). Wiederverwendung von Schütz (2013) mit Genehmigung der Springer Nature Customer Service Center GmbH. © Springer Fachmedien Wiesbaden 2013.....	40
Bild 2.15: Radumströmung – a) stehendes b) rotirendes Rad (Schütz 2012b: 35)	42
Bild 2.16: Strömungsfelder hinter einem Vollheck (links), Fließheck (Mitte), Stufenheck (rechts) in jeweils vier $x = const.$ Ebenen. Wiederverwendung von Hucho (2005) mit Genehmigung der Springer Nature Customer Service Center GmbH. © Springer Fachmedien Wiesbaden 2005.	43
Bild 2.17: Strömungstopologie - a) zeitlich gemittelt b) zeitabhängig. Wiederverwendung von Schütz (2013) mit Genehmigung der Springer Nature Customer Service Center GmbH. © Springer Fachmedien Wiesbaden 2013.	44
Bild 2.18: Bezeichnung der Bauelemente eines Windkanals. Wiederverwendung von Hucho (2005) mit Genehmigung der Springer Nature Customer Service Center GmbH. © Springer Fachmedien Wiesbaden 2005.....	45
Bild 2.19: Verlauf des statisches Druckes in ausgewählten Windkanälen (Schütz 2012a: 7-154)	45
Bild 3.1: Unterschiedliche Anordnung der Boxen bei untersuchten Gittern.....	49
Bild 3.2: <i>Selections</i> der Flächenverfeinerung, Stufe ref1 und ref2.	49
Bild 3.3: <i>Selections</i> der Kantenverfeinerung, Stufe ref1 und ref2.....	50
Bild 3.4: Ausgewählte <i>Selections</i> für Generierung der <i>Boundary Layers</i>	50
Bild 3.5: Histogramm des Luftwiderstands cd und Auftriebs cl des Fahrzeuges mit und ohne Räder von Fällen der Gitterstudie.....	52
Bild 3.6: Verläufe des Luftwiderstands cd , der Seitenkraft cs des Auftriebs cl aus Fällen der Gitterstudie.....	57
Bild 4.1: <i>Selections</i> der Flächenverfeinerung, Stufe ref1, ref2 und ref3.....	62
Bild 4.2: <i>Selections</i> für Kantenverfeinerung (Stufe ref, ref1, ref2, ref3), für die <i>Boundary Layers</i> Generierung, für die <i>Surface Intersection</i> Funktion und die Boxenanordnung.....	63
Bild 4.3: Darstellung der Anbringung der Räder auf den Boden.....	65
Bild 4.4: Grenzschichtabsaugung im Windkanal; Abschätzung und Realisieren der Ein- und Austrittsflächen.....	65
Bild 4.5: Verläufe des Luftwiderstands cd , der Seitenkraft cs , des Auftriebs cl bei unterschiedlicher Anbringung der Räder.	66
Bild 4.6: Werte des gemittelten Druckbeiwerts cp in Messpunkten am Bug, am Heck, auf der linken und rechten Seite, auf der Ober- und Unterseite bei unterschiedlicher Anbringung der Räder.	67

Bild 4.7: Vergleich des gemittelten Druckbeiwerts cp auf der Oberfläche des <i>RealCar</i> , der gemittelten U -Geschwindigkeit im Längsmittelschnitt, der Strukturen des gemittelten Q -Kriteriums und der Wirbelstärke bei unterschiedlicher Anbringung der Räder.....	68
Bild 4.8: Verläufe des Luftwiderstands cd , der Seitenkraft cs , des Auftriebs cl der Berechnungen mit einem CDS Schema.....	69
Bild 4.9: Histogramm des Luftwiderstands cd und des Auftriebs cl des <i>RealCar</i> mit und ohne Räder bei CDS und <i>AVL SMART Relaxed</i> Schema.....	70
Bild 4.10: Verläufe des Luftwiderstands cd , der Seitenkraft cs , des Auftriebs cl bei der rechteckigen Domäne und dem Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i>	72
Bild 4.11: Verläufe des Rollmomentbeiwerts cMx , Nickmomentbeiwerts cMy , des Giermomentbeiwerts cMz bei der rechteckigen Domäne und dem Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i>	72
Bild 4.12: Histogramm des Luftwiderstands cd , Seitenkraft cs , Auftriebs cl , des Roll- cMx , Nick- cMy und Giermomentbeiwerts cMz des <i>RealCar</i> mit Rädern bei der rechteckigen Domäne und dem Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i>	73
Bild 4.13: Histogramm des Auftriebs cl auf der Vorder- und Hinterachse des <i>RealCar</i> mit Rädern bei der rechteckigen Domäne und dem Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i>	75
Bild 4.14: Differenz des gemittelten Druckbeiwerts cp auf der Ober- und Unterseite zwischen der rechteckigen Domäne und dem Windkanalnachbau (links) und bei ein- und ausgeschalteter Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i> (rechts).....	76
Bild 4.15: Werte des gemittelten Druckbeiwerts cp in Messpunkten am Bug, am Heck, auf der linken und rechten Seite, auf der Ober- und Unterseite im Windkanalnachbau mit ein- und ausgeschalteter Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i>	78
Bild 4.16: Verlauf des gemittelten und augenblicklichen Druckbeiwerts cp auf der Ober- und Unterseite im Windkanalnachbau mit ein- und ausgeschalteter Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i>	78
Bild 4.17: Vergleich des gemittelten Druckbeiwerts cp auf der Oberfläche des <i>RealCar</i> im Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i>	80
Bild 4.18: Vergleich der gemittelten U -Geschwindigkeit im Längsmittelschnitt im Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i>	80
Bild 4.19: Vergleich der gemittelten Geschwindigkeit im Längsmittelschnitt in der rechteckigen Domäne und im Windkanalnachbau ohne Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i>	81
Bild 4.20: Vergleich der gemittelten Geschwindigkeit in der horizontalen Ebene $z = 0,08m$ in der rechteckigen Domäne und im Windkanalnachbau ohne Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i>	81
Bild 4.21: Vergleich der Längswirbel im Nachlauf des <i>RealCar</i> bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i>	82
Bild 4.22: Vergleich der Totwässer des <i>RealCar</i> bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i>	82
Bild 4.23a: Vergleich der gemittelten U -Geschwindigkeit im Längsmittelschnitt bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i>	83
Bild 4.23b: Augenblickliche Geschwindigkeit im Längsmittelschnitt bei PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i>	83
Bild 4.24: Vergleich der Strukturen des gemittelten Q -Kriteriums durch gemittelte Geschwindigkeit gefüllt bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i>	83
Bild 4.25: Vergleich der Strukturen des augenblicklichen Q -Kriteriums durch augenblickliche Geschwindigkeit gefüllt bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i>	84
Bild 4.26: Vergleich der Strukturen der augenblicklichen Wirbelstärke durch augenblickliche Geschwindigkeit gefüllt bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i>	84
Bild 4.27a: Vergleich der augenblicklichen turbulenten kinetischen Energie in der Fahrzeughöhe bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i>	84
Bild 4.27b: Gemittelte turbulente kinetische Energie in der Fahrzeughöhe bei PANS Verfahren mit Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i>	85
Bild 4.28: Vergleich der augenblicklichen Dissipationsrate in der Fahrzeughöhe bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i>	85
Bild 4.29: Vergleich des fk Parameters mit dem Verhältnis ku durch $ktot$ in der Fahrzeughöhe und in gesamter Domäne beim PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i>	86

Bild 4.30: y +-Wert auf der Oberfläche des <i>RealCar</i> im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i> .	86
Bild 4.31: CFL-Zahl in der Fahrzeugnähe und in gesamter Domäne beim PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i> .	87
Bild 4.32: δ/η Kennzahl in der Fahrzeugnähe und in gesamter Domäne beim PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i> .	87
Bild 4.33: Vergleich des Druckverlaufs in leerer Messstrecke bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i> .	88
Bild 4.34: Vergleich des Druckbeiwerts c_p beim URANS Verfahren im leeren Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i> .	88
Bild 4.35: Vergleich der gemittelten U -Geschwindigkeit im Längsmittelschnitt im leeren Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i> .	89
Bild 4.36: Vergleich der gemittelten U -Geschwindigkeit in der horizontalen Ebene $z = 0,08m$ im leeren Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i> .	89
Bild 4.37: Bestimmung der Düsenlänge des Windkanalnachbaus nach empirischer Gleichung des Grenzschichtwachstums auf ebener Platte.	89
Bild 4.38: Vergleich der Geschwindigkeits-profile an der Stelle $x = -2,5m$ im leeren Windkanalnachbau mit und ohne <i>BLC</i> .	90
Bild 4.39: Vergleich der Strukturen des augenblicklichen Q -Kriteriums durch augenblickliche Geschwindigkeit gefüllt bei RANS, URANS, PANS Verfahren im leeren Windkanalnachbau ohne Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i> .	90
Bild 4.40: Vergleich des Rechenaufwands in Prozessorstunden bei RANS, URANS, PANS Verfahren auf verwendeten Hochleistungsrechnern (links) und Speedup einer <i>RealCar</i> Berechnung auf dem <i>lClutser</i> (rechts).	92
Bild 5.1: Boxenanordnung für die Domänen <i>CAR</i> und <i>TRUCK</i> .	97
Bild 5.2: <i>Selections</i> der Flächenverfeinerung, Stufe ref_3 , ref_4 beim <i>TRUCK</i> .	99
Bild 5.3: <i>Selections</i> für Kantenverfeinerung, Stufe re_4 , ref_5 beim <i>TRUCK</i> .	100
Bild 5.4: <i>Selections</i> für die <i>Boundary Layers</i> Generierung und für die <i>Surface Intersection</i> Funktion beim <i>TRUCK</i> .	100
Bild 5.5: Darstellung der Vernetzung und Anordnung bei ausgewählter Position $x_L = 0,39$.	101
Bild 5.6: Positionierung PKW-LKW in 8 diskreten Positionen des Überholvorgangs.	103
Bild 5.7: Verläufe des Luftwiderstands c_d , der Seitenkraft c_s , des Auftriebs c_l des PKWs und LKWs bei der Gitterstudie in rechteckiger Domäne ohne Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i> .	104
Bild 5.8: Verläufe des Rollmomentbeiwerts c_{Mx} , Nickmomentbeiwerts c_{My} , des Giermomentbeiwerts c_{Mz} des PKWs und LKWs bei der Gitterstudie in rechteckiger Domäne ohne <i>BLC</i> .	104
Bild 5.9: Histogramme der Luftwiderstand- und Momentenbeiwerte des PKWs (mit Rädern) und LKWs bei der Gitterstudie in rechteckiger Domäne ohne <i>BLC</i> in der Position $x_L = 0,39$.	105
Bild 5.10: Werte des gemittelten Druckbeiwerts c_p auf der rechten PKW-Seite bei der Gitterstudie in rechteckiger Domäne ohne <i>BLC</i> in der Position $x_L = 0,39$.	106
Bild 5.11: Vergleich der gemittelten Geschwindigkeit in der horizontalen Ebene $z = 0,08m$ bei der Gitterstudie in rechteckiger Domäne ohne <i>BLC</i> in der Position $x_L = 0,39$.	106
Bild 5.12: Vergleich des y +-Wertes auf der PKW- und LKW-Oberfläche bei der Gitterstudie in rechteckiger Domäne ohne <i>BLC</i> in der Position $x_L = 0,39$.	106
Bild 5.13: Verläufe des Luftwiderstands c_d , der Seitenkraft c_s , des Auftriebs c_l des PKWs und LKWs bei dem Windkanalnachbau mit und ohne <i>BLC</i> in der Position $x_L = 0,39$.	107
Bild 5.14: Verläufe des Rollmomentbeiwerts c_{Mx} , Nickmomentbeiwerts c_{My} , des Giermomentbeiwerts c_{Mz} des PKWs und LKWs bei dem Windkanalnachbau mit und ohne <i>BLC</i> in der Position $x_L = 0,39$.	108
Bild 5.15: Histogramm des Luftwiderstands c_d , Seitenkraft c_s , Auftriebs c_l , des Roll- c_{Mx} , Nick- c_{My} und Giermomentbeiwerts c_{Mz} des PKWs (mit Rädern) und LKWs bei rechteckiger Domäne und dem Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung <i>BLC</i> in der Position $x_L = 0,39$.	109
Bild 5.16: Vergleich des Druckverlaufs auf der Ober- und Unterseite des PKWs in der rechteckigen Domäne und im Windkanalnachbau mit und ohne <i>BLC</i> in der Position $x_L = 0,39$.	110
Bild 5.17: Differenz des gemittelten Druckbeiwerts c_p auf der Ober- und Unterseite des PKWs zwischen der rechteckigen Domäne und dem Windkanalnachbau mit und ohne <i>BLC</i> in $x_L = 0,39$.	111

Bild 5.18: Werte des gemittelten Druckbeiwerts cp in Messpunkten auf der rechten und linken PKW-Seite in der rechteckigen Domäne und im Windkanalnachbau mit und ohne BLC bei $xL = 0,39$.	112
Bild 5.19: Vergleich des gemittelten Druckbeiwerts cp in der horizontalen Ebene $z = 0,08m$ in der rechteckigen Domäne und im Windkanalnachbau mit und ohne BLC in der Position $xL = 0,39$.	112
Bild 5.20: Vergleich der gemittelten U -Geschwindigkeit in der horizontalen Ebene $z = 0,08m$ und im Längsmittelschnitt in der rechteckigen Domäne und im Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung BLC in der Position $xL = 0,39$.	113
Bild 5.21: Verläufe des Luftwiderstands cd , der Seitenkraft cs , des Auftriebs cl des PKWs und LKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in allen Positionen der Überholung.	116
Bild 5.22: Verläufe des Rollmomentbeiwerts cMx , Nickmomentbeiwerts cMy , des Giermomentbeiwerts cMz des PKWs und LKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in allen Positionen der Überholung.	118
Bild 5.23: Verlauf des Luftwiderstands cd , der Seitenkraft cs , des Auftriebs cl des PKWs und LKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC über alle Positionen der Überholung.	118
Bild 5.24: Verlauf des Rollmomentbeiwerts cMx , Nickmomentbeiwerts cMy , des Giermomentbeiwerts cMz des PKWs und LKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC über alle Positionen der Überholung.	120
Bild 5.25: Verlauf des Luftwiderstands cd , der Seitenkraft cs , des Auftriebs cl (auf der Vorder- und Hinterachse), des Roll- cMx , Nick- cMy und des Giermomentbeiwerts cMz des PKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC über alle Positionen der Überholung.	121
Bild 5.26: Die Druckveränderung bei der Überholung auf der Oberseite des PKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC im Vergleich zum Solofahrzeug in allen Positionen.	123
Bild 5.27: Die Druckveränderung bei der Überholung auf der Unterseite des PKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC im Vergleich zum Solofahrzeug in allen Positionen.	124
Bild 5.28: Die Druckveränderung bei der Überholung am Bug und am Heck des PKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC im Vergleich zum Solofahrzeug in allen Positionen.	125
Bild 5.29: Die Druckveränderung bei der Überholung auf der rechten Seite des PKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC im Vergleich zum Solofahrzeug in allen Positionen.	126
Bild 5.30: Die Druckveränderung bei der Überholung auf der linken Seite des PKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC im Vergleich zum Solofahrzeug in allen Positionen.	127
Bild 5.31: Verlauf des gemittelten Druckbeiwerts cp auf der Ober- und Unterseite des PKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in allen Positionen der Überholung.	128
Bild 5.32: Druckdifferenz zwischen der rechten und linken Seite des PKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in allen Positionen der Überholung.	130
Bild 5.33: Vergleich des gemittelten Druckbeiwerts cp in der horizontalen Ebene $z = 0,08m$ beim PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in allen Positionen der Überholung.	131
Bild 5.34: Vergleich des gemittelten Druckbeiwerts cp auf der Oberfläche des PKWs beim PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in allen Positionen der Überholung.	131
Bild 5.35: Vergleich der gemittelten Geschwindigkeit in der horizontalen Ebene $z = 0,08m$ beim PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in allen Positionen der Überholung.	132
Bild 5.36: Vergleich der gemittelten U -Geschwindigkeit in der horizontalen Ebene $z = 0,08m$ beim PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in allen Positionen der Überholung.	133
Bild 5.37: Vergleich der gemittelten U -Geschwindigkeit im PKW- und LKW-Längsmittelschnitt bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in allen Positionen der Überholung.	136
Bild 5.38: Vergleich der augenblicklichen U -Geschwindigkeit im PKW- und LKW-Längsmittelschnitt beim PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in der Position $xL = 0,39$.	136
Bild 5.39: Vergleich der Totwässer des PKWs und LKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in allen Positionen der Überholung.	138
Bild 5.40: Vergleich der Strukturen des gemittelten Q -Kriteriums durch gemittelte Geschwindigkeit gefüllt bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in allen Positionen der Überholung.	140

Bild 5.41: Vergleich der Strukturen des augenblicklichen Q -Kriteriums durch augenblickliche Geschwindigkeit gefüllt bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in allen Positionen der Überholung.....	142
Bild 5.42: Vergleich der Strukturen der augenblicklichen Wirbelstärke durch augenblickliche Geschwindigkeit gefüllt bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in allen Positionen der Überholung.....	143
Bild 5.43a: Vergleich der augenblicklichen turbulenten kinetischen Energie im PKW- und LKW-Längsmittelschnitt bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in der Position $xL = 0,39$	144
Bild 5.43b: Gemittelte turbulente kinetische Energie im PKW- und LKW-Längsmittelschnitt bei PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in der Position $xL = 0,39$	144
Bild 5.44: Vergleich der augenblicklichen Dissipationsrate im PKW- und LKW-Längsmittelschnitt bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in der Position $xL = 0,39$	144
Bild 5.45: Vergleich des fk Parameters mit dem Verhältnis ku durch $ktot$ in der Fahrzeughöhe und in gesamter Domäne beim PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in der Position $xL = 0,39$	146
Bild 5.46: Vergleich des y +-Wertes auf der PKW- und LKW-Oberfläche beim PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in der Position $xL = 0,39$	146
Bild 5.47: CFL-Zahl in der Fahrzeughöhe und in gesamter Domäne bei URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in der Position $xL = 0,39$	147
Bild 5.48: δ/η Kennzahl in der Fahrzeughöhe und in gesamter Domäne bei URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in der Position $xL = 0,39$	147
Bild 5.49: Vergleich des Rechenaufwands in Prozessorstunden bei RANS, URANS, PANS Verfahren auf verwendeten Hochleistungsrechnern (links) und Speedup einer <i>RealCar_n_Truck</i> Berechnung auf dem <i>lClutser</i> (rechts).....	149
Bild 6.1: Darstellung der Vernetzung und Gitterbewegung bei der Anfangs- $xL = -6,00$ und Endposition $xL = 6,00$	154
Bild 6.2: Verläufe des Luftwiderstands cd , Seitenkraft cs , Auftriebs cl , des Roll- cMx , Nick- cMy und Giermomentbeiwerts cMz des PKWs (mit Rädern) und LKWs bei <i>Beginning-slip</i> - Simulationen mit und ohne Rotation der Räder.....	156
Bild 6.3: Verläufe des Luftwiderstands cd , Seitenkraft cs , Auftriebs cl , des Roll- cMx , Nick- cMy und Giermomentbeiwerts cMz des PKWs (mit Rädern) und LKWs bei <i>Beginning-move</i> - Simulationen mit und ohne Rotation der Räder.....	156
Bild 6.4: Vergleich der Verläufe des Luftwiderstands cd , der Seitenkraft cs , des Auftriebs cl des PKWs (mit Rädern) und LKWs beim URANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip</i> - / <i>move</i> - Simulationen ohne Rotation der Räder.....	158
Bild 6.5: Vergleich der Verläufe des Luftwiderstands cd , der Seitenkraft cs , des Auftriebs cl des PKWs (mit Rädern) und LKWs beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip</i> - / <i>move</i> - Simulationen mit Rotation der Räder.....	159
Bild 6.6: Vergleich der Verläufe des Luftwiderstands cd , der Seitenkraft cs , des Auftriebs cl des PKWs (mit Rädern) und LKWs beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip</i> - Simulationen mit Rotation der Räder als Zeitschrittstudie.....	161
Bild 6.7: Vergleich der Verläufe des Rollmomentbeiwerts cMx , Nickmomentbeiwerts cMy , des Giermomentbeiwerts cMz des PKWs (mit Rädern) und LKWs beim URANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip</i> - / <i>move</i> - Simulationen ohne Rotation der Räder.....	162
Bild 6.8: Vergleich der Verläufe des Rollmomentbeiwerts cMx , Nickmomentbeiwerts cMy , des Giermomentbeiwerts cMz des PKWs (mit Rädern) und LKWs beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip</i> - / <i>move</i> - Simulationen mit Rotation der Räder.....	163
Bild 6.9: Vergleich der Verläufe des Rollmomentbeiwerts cMx , Nickmomentbeiwerts cMy , des Giermomentbeiwerts cMz des PKWs (mit Rädern) und LKWs beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip</i> - Simulationen mit Rotation der Räder als Zeitschrittstudie.....	165
Bild 6.10: Die Druckveränderung bei der Überholung auf der Oberseite des PKWs beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip-rot</i> - / <i>move-rot</i> - und <i>RealCar_n_Truck-Wheels-BLC</i> - Simulationen zum Solofahrzeug <i>RealCar_Calculation4-Wheels-BLC</i> - in allen Positionen.....	170

Bild 6.11: Die Druckveränderung bei der Überholung auf der Unterseite des PKWs beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-</i> und <i>RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-</i> Simulationen zum Solofahrzeug <i>RealCar_Calculation4-Wheels-BLC-</i> in allen Positionen.....	171
Bild 6.12: Die Druckveränderung bei der Überholung am Bug und am Heck des PKWs beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-</i> und <i>RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-</i> Simulationen zum Solofahrzeug <i>RealCar_Calculation4-Wheels-BLC-</i> in allen Positionen.....	172
Bild 6.13: Die Druckveränderung bei der Überholung auf der rechten Seite des PKWs beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-</i> und <i>RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-</i> Simulationen zum Solofahrzeug <i>RealCar_Calculation4-Wheels-BLC-</i> in allen Positionen.....	174
Bild 6.14: Die Druckveränderung bei der Überholung auf der linken Seite des PKWs beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-</i> und <i>RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-</i> Simulationen zum Solofahrzeug <i>RealCar_Calculation4-Wheels-BLC-</i> in allen Positionen.....	175
Bild 6.15: Verlauf des gemittelten Druckbeiwerts cp auf der Ober- und Unterseite des PKWs beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-</i> und <i>RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-</i> Simulationen in allen Positionen der Überholung.....	176
Bild 6.16: Druckdifferenz zwischen der rechten und linken Seite des PKWs beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-</i> und <i>RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-</i> Simulationen in allen Positionen der Überholung.....	177
Bild 6.17: Vergleich des augenblicklichen Druckbeiwerts cp auf der Oberfläche des PKWs und LKWs beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-</i> und <i>RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-</i> Simulationen in allen Positionen der Überholung.....	181
Bild 6.18: Vergleich des augenblicklichen Druckbeiwerts cp in der horizontalen Ebene $z = 0,08m$ beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-</i> und <i>RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-</i> Simulationen in allen Positionen der Überholung.....	183
Bild 6.19: Vergleich der augenblicklichen U -Geschwindigkeit in der horizontalen Ebene $z = 0,08m$ beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-</i> und <i>RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-</i> Simulationen in allen Positionen der Überholung.....	186
Bild 6.20: Vergleich der augenblicklichen U -Geschwindigkeit im PKW- und LKW-Längsmittelschnitt beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-</i> und <i>RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-</i> Simulationen in allen Positionen der Überholung.....	187
Bild 6.21: Vergleich der Totwässer des PKWs und LKWs beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-</i> und <i>RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-</i> Simulationen in allen Positionen der Überholung.....	191
Bild 6.22: Vergleich der Strukturen des augenblicklichen Q -Kriteriums durch augenblickliche U -Geschwindigkeit gefüllt beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-</i> und <i>RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-</i> Simulationen in allen Positionen der Überholung.....	193
Bild 6.23: Vergleich der Strukturen des augenblicklichen Q -Kriteriums durch augenblickliche U -Geschwindigkeit gefüllt beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip-rot-</i> Simulationen mit unterschiedlichen Zeitschritten in der Position $xL = 0,39$ als Zeitschrittstudie.....	194
Bild 6.24: Vergleich der augenblicklichen totalen turbulenten kinetischen Energie im PKW- und LKW-Längsmittelschnitt beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-</i> und <i>RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-</i> Simulationen in der Position $xL = 0,39$	195
Bild 6.25: Vergleich der augenblicklichen Dissipationsrate im PKW- und LKW-Längsmittelschnitt beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-</i> und <i>RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-</i> Simulationen in der Position $xL = 0,39$	195
Bild 6.26: Vergleich des fk Parameters mit dem Verhältnis ku durch $ktot$ in der Fahrzeugnähe beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-</i> und <i>RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-</i> Simulationen in der Position $xL = 0,39$	196
Bild 6.27: Vergleich des fk Parameters mit dem Verhältnis ku durch $ktot$ in gesamter Domäne beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-</i> und <i>RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-</i> Simulationen in der Position $xL = 0,39$	197
Bild 6.28: Vergleich des y +-Wertes auf der PKW- und LKW-Oberfläche beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-</i> und <i>RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-</i> Simulationen in der Position $xL = 0,39$	198
Bild 6.29: CFL-Zahl in der Fahrzeugnähe und in gesamter Domäne beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-</i> und <i>RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-</i> Simulationen in der Position $xL = 0,39$	198

Bild 6.30: <i>delta/eta</i> Kennzahl in der Fahrzeugnähe und in gesamter Domäne beim PANS Verfahren der <i>Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-</i> und <i>RealCar_n_Truck-Wheels-BLC</i> - Simulationen in der Position $xL = 0,39$	199
Bild 6.31: Vergleich des Rechenaufwands in Prozessorstunden bei URANS, PANS Verfahren der <i>Beginning- / Manoeuvre-</i> Simulationen auf dem <i>ICluster</i>	201
Bild A.1: Beispiel einer Ausgabe eines Zeitschrittes der <i>.fla</i> Datei.	224

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Einstellungen des <i>FAME Hexa</i> Vernetzers bei Gitterstudie für Fall: <i>Single_Car_mesh-study_8, mio_11a</i>	48
Tabelle 3.2: Gittervarianten mit variierten Verfeinerungsstufen und Dicken.....	50
Tabelle 3.3: Gitterbauteile mit ihren Abmessungen, Zellgrößen und Schichten.	51
Tabelle 3.4: Liste der generierten Gitter mit ihrer Zellenanzahl.....	52
Tabelle 3.5: Gitterstudie - Luftwiderstandsbeiwerte von Karosserie mit und ohne Räder.	52
Tabelle 4.1: Einstellungen des <i>FAME Hexa</i> Vernetzers beim <i>RealCar_Calculation4</i>	60
Tabelle 4.2: Gitterbauteile mit ihren Abmessungen, Zellgrößen und Schichtenanzahl.	64
Tabelle 4.3: Liste der in diesem Kapitel verwendeten Interfaces, mit dazugehörigen <i>Selections</i> , Zellenanzahl und weiteren Einstellungen.	64
Tabelle 4.4: Liste der in diesem Kapitel verwendeten Gitter mit Zellenanzahl.	65
Tabelle 4.5: Luftwiderstandsbeiwerte der Räder bei unterschiedlicher Anbringung auf den Boden.....	66
Tabelle 4.6: <i>Realcar</i> - Luftwiderstandsbeiwerte vom Fahrzeug mit und ohne Räder.	70
Tabelle 4.7: <i>Realcar</i> - Momentenbeiwerte vom Fahrzeug mit und ohne Räder.....	71
Tabelle 4.8: Liste der verwendeten Hochleistungsrechner mit ihren Merkmalen.	91
Tabelle 4.9: Liste von im Kapitel 4 Umströmung eines realistischen Fahrzeuges (<i>RealCar</i>) durchgeführten Simulationen mit verwendeten Ressourcen und ihrem Rechenaufwand.....	92
Tabelle 5.1: Einstellungen des <i>FAME Hexa</i> Vernetzers des <i>CAR</i> Teils beim <i>RealCar_n_Truck_positions</i>	96
Tabelle 5.2: Einstellungen des <i>FAME Hexa</i> Vernetzers des Teils <i>TRUCK</i> (fein) beim <i>RealCar_n_Truck_positions</i>	98
Tabelle 5.3: Einstellungen des <i>FAME Hexa</i> Vernetzers des Teils <i>TRUCK</i> (grob) beim <i>RealCar_n_Truck_positions</i>	98
Tabelle 5.4: Gitterbauteile der Baugruppen <i>C</i> und <i>T</i> mit ihren Abmessungen, Zellgrößen und Schichtenanzahl bei ausgewählter Position $xL = 0,39$	101
Tabelle 5.5: Liste der in diesem Kapitel verwendeten Interfaces bei allen Positionen, mit dazugehörigen <i>Selections</i> , Zellenanzahl und weiteren Einstellungen.....	102
Tabelle 5.6: Liste der in diesem Kapitel verwendeten Gitter bei jeder Position mit Zellenanzahl.....	102
Tabelle 5.7: <i>Realcar_n_Truck</i> - Luftwiderstandsbeiwerte vom PKW (mit Rädern) und vom LKW in der Position $xL = 0,39$	104
Tabelle 5.8: <i>Realcar_n_Truck</i> - Momentenbeiwerte vom PKW (mit Rädern) und vom LKW in der Position $xL = 0,39$	105
Tabelle 5.9: <i>Realcar_n_Truck</i> - Luftwiderstandsbeiwerte vom PKW (mit Rädern) und vom LKW bei RANS, URANS, PANS Verfahren in allen Positionen der Überholung.....	114
Tabelle 5.10: <i>Realcar_n_Truck</i> - Momentenbeiwerte vom PKW (mit Rädern) und vom LKW bei RANS, URANS, PANS Verfahren in allen Positionen der Überholung.....	115
Tabelle 5.11: Liste von im Kapitel 5 Quasi-stationärer PKW-LKW Überholvorgang (<i>RealCar and Truck</i>) durchgeführten Simulationen mit verwendeten Ressourcen und ihrem Rechenaufwand.....	148
Tabelle 6.1: Gitterbauteile der Baugruppen <i>C</i> und <i>T</i> mit ihren Abmessungen, Zellgrößen und Schichtenanzahl bei der Ausgangsposition $xL = 0,00$	153
Tabelle 6.2: Liste der in diesem Kapitel verwendeten Interfaces, mit dazugehörigen <i>Selections</i> , Zellenanzahl und weiteren Einstellungen.	153
Tabelle 6.3: Liste der in diesem Kapitel verwendeten Gitter mit Zellenanzahl.	153
Tabelle 6.4: Liste der in diesem Kapitel durchgeführten Simulation mit entsprechendem Simulationsverfahren und Zeitschrittgröße.	155
Tabelle 6.5: Liste von allen durchgeführten <i>Beginning</i> - Simulationen mit verwendeten Ressourcen und ihrem Rechenaufwand.....	200
Tabelle 6.6: Liste von allen durchgeführten <i>Manoeuvre</i> - Simulationen mit verwendeten Ressourcen und ihrem Rechenaufwand.....	200
Tabelle A.1: Ausgabefrequenz der <i>2D Results</i> bei stationären und instationären Simulationen.....	221
Tabelle A.2: Ausgabefrequenz der <i>3D Results</i> bei instationären Simulationen.	223
Tabelle A.3: Ausgabefrequenz der <i>backup</i> Dabei bei stationären und instationären Simulationen.	224
Tabelle B.1: Ausgabefrequenz der <i>2D Results</i> bei stationären und instationären Simulationen.	229
Tabelle B.2: Ausgabefrequenz der <i>3D Results</i> bei instationären Simulationen.	230
Tabelle B.3: Ausgabefrequenz der <i>backup</i> Dabei bei stationären und instationären Simulationen.	230

Tabelle C.1: Größe und Abstufung des Zeitschrittes bei <i>Beginning-slip- / move-</i> und <i>Manoeuvre-slip- / move-</i> Simulationen.	233
Tabelle C.2: Ausgabefrequenz der <i>2D Results</i> bei <i>Beginning-slip- / move-</i> und <i>Manoeuvre-slip- / move-</i> Simulationen.	237
Tabelle C.3: Ausgabefrequenz der <i>3D Results</i> bei <i>Beginning-slip- / move-</i> und <i>Manoeuvre-slip- / move-</i> Simulationen.	239
Tabelle C.4: Ausgabefrequenz der <i>backup</i> Dabei bei <i>Beginning-slip- / move-</i> und <i>Manoeuvre-slip- / move-</i> Simulationen.	240

1. Einleitung

1.1. Einführung, Stand der Arbeiten, Motivation

Die Aerodynamik eines Automobils lässt sich in zwei Kategorien unterteilen: Zum einen die Umströmung eines Fahrzeuges und zum anderen die Durchströmung der Karosserie. Beide Kategorien sind einander gekoppelt und beeinflussen sich gegenseitig. So zum Beispiel die Strömung aus dem Motorraum beeinflusst die Unterbodenströmung.

Wie auf dem Bild 1.1 dargestellt, beeinflusst die Aerodynamik eines Fahrzeuges viele Faktoren (vgl. Hucho 2005: 1). Einer der wichtigsten Faktoren ist die Richtungsstabilität, die den Geradeauslauf, das Eigenlenkverhalten, die Reaktion auf Seitenwind und das Überholen beeinflusst. Wichtig sind aber auch lokale Strömungsfelder. Die Umströmung muss so geführt werden, dass Verschmutzung der Scheiben und der Leuchten vermieden wird. Es dürfen keine Windgeräusche bei Seitenspiegel, Türdichtungen und -spalten entstehen. Die Ölwanne des Motors und die Bremsen müssen gemäß gekühlt werden (vgl. Hucho 2005: 2).



Bild 1.1 Aerodynamische Faktoren. Wiederverwendung von Hucho (2005) mit Genehmigung der Springer Nature Customer Service Center GmbH. © Springer Fachmedien Wiesbaden 2005.

Bei der Durchströmung der Karosserie muss die Verlustwärme des Motors und die Wärme aus den Kühlern und dem Auspuff abgetragen werden. Im Fahrgastraum muss ein angenehmes Klima herrschen (vgl. Hucho 2005: 2). Insgesamt hat die Aerodynamik einen großen Einfluss auf die Anordnung des Fahrzeugs. Aerodynamik beeinflusst nicht nur die äußere Form, sondern auch viele konstruktive Details (vgl. Hucho 2005: 2).

Fahrzeuge sind in der Terminologie der Strömungsmechanik stumpfe Körper mit komplexer Geometrie, die sich mit kleinem Bodenabstand auf der Fahrbahn bewegen. Ihre Umströmung ist dreidimensional und turbulent. Charakteristisch sind instationäre Ablösungen. Am Heck bildet sich Totwasser, das dann in Strömungsrichtung in den Nachlauf übergeht. Beim PKW entstehen an den A-Säulen und am Heck Längswirbel. Das Totwasser und die Längswirbel interferieren miteinander. Die Strömung beeinflusst auch die rotierenden Räder (vgl. Hucho 2005: 1). Zu den Produktmerkmalen eines Autos gehört u.a. seine Fahrleistungen wie Verbrauch, Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigungsvermögen. Diese Fahrleistungen hängen von dem Luftwiderstand ab. Daher stellt der Luftwiderstand eine wichtige Eigenschaft dar. Sein dimensionsloser Beiwert c_d dient dann wie ein Vergleichswert (vgl. Hucho 2005: 1).

Um die Fahrzeugumströmung besser zu verstehen, werden Windkanäle und numerische Berechnungen benutzt. Durch Rauchfäden im Windkanal lassen sich die Stromlinien sichtbar machen. Verbreiteter Rauch zeigt die Stelle des Totwassers (vgl. Hucho 2005: 3). Die Mehrkomponentenwagen messen dann die Luftwiderstände und Momente. Durch Drucksensoren auf der Fahrzeugoberfläche lässt sich der Druck messen.

Windkanalmessungen haben aber mehrere Einschränkungen: Bei skalierten Modellen ist die Reynoldszahl zu niedrig und die Ausarbeitung von allen Details schwierig. Die Messstrecke ist endlich, die Blockierung der Düse muss korrigiert werden und Fahrbahn lässt sich nur teilweise darzustellen. Zudem sind Untersuchungen an

Fahrzeugen in natürlicher Größe teuer; ebenso die Messzeit im Windkanal (vgl. Hucho 2005: 985). Die numerischen Verfahren sind gut geeignet in der frühen Phase der Entwicklung, da viele Varianten zu relativ niedrigen Kosten untersucht werden können. Danach kommen nur relevante Varianten ins Spiel, die dann näher im Windkanal untersucht werden (vgl. Hucho 2005: 985).

Der entscheidende Unterschied zwischen Untersuchungen unter Berücksichtigung eines isolierten Einzelautos und eines auf einer Straße fahrenden Autos, die von einem natürlichen Windstoß oder den von umgebenden Fahrzeugen erzeugten Nachläufen beeinflusst werden, liegt in den strukturellen Merkmalen der entgegenkommenden Strömung. Während die Bewertung der aerodynamischen Eigenschaften eines Autos traditionell auf Windkanaluntersuchungen beruht, die unter den "idealisierten" Bedingungen einer homogenen, stetigen Gegenströmung durchgeführt werden, die durch ein geringes Turbulenzniveau gekennzeichnet ist, zeigt die Strömungssituation auf der Straße ein ganz anderes Bild. Ein fahrendes Auto erfährt eine sehr instabile, hoch turbulente Umgebung, die das aerodynamische Verhalten eines Fahrzeugs wesentlich beeinflusst. Die relevante Konfiguration entspricht der Umströmung an einem Auto, das sich im Nachlauf eines Lastwagens befindet, was einer Situation entspricht, die häufig während eines Autobahnmanövers auftritt. Die ankommenden Turbulenzen verursachen besonders verstärkte Strömungsscherung; eine verstärkte Wechselwirkung zwischen mehreren Scherschichten beeinflusst anschließend die Erzeugung des Nachlaufbereichs. Im Gegensatz zu einem isolierten Einzelauto weisen die mit einem Überholauto verbundenen aerodynamischen Kräfte und Momente erhebliche zeitliche und räumliche Schwankungen auf.

Eine umfassende experimentelle Studie über die Turbulenzen auf der Straße und ihre Struktur in Bezug auf Intensität, Spektralgehalt und charakteristische Längenskalen, die von unterschiedlichen Gelände- und Verkehrsbedingungen (glattes Gelände, Stadtschlucht, Autobahnverkehr; Auswirkungen der Nachläufe anderer am Straßenverkehr teilnehmenden Fahrzeugen) beeinflusst werden, wurde von Wordley und Saunders (2008, 2009) durchgeführt. Eine frühere Studie zu Überholvorgängen wurde von Noger et al. (2005) durchgeführt, der experimentell ein Windkanal-Überholmanöver untersuchte, an dem ein beweglicher und ein fester Ahmed-Körper mit quadratischem Rücken beteiligt waren. Sie konzentrierten sich insbesondere auf den Einfluss der Überholgeschwindigkeit, der Variation des Gierwinkels und des seitlichen Abstands. Die Sekundärfahrzeuge waren mit einem mittelgroßen Lieferwagen und einem 3,5-t-LKW vertreten. Dementsprechend wurden unterschiedlich asymmetrische Druckverteilungen an Personenkraftwagen erhalten, was auf eine erhebliche Intensitätsänderung der Querbeschleunigung bei verschiedenen Gierbedingungen und seitlichen Abständen hinweist. Eine Korrelation mit dem Fahrzeuginstabilitätsniveau wurde hergestellt. Das Ziel der umfassenden experimentellen Studie von Schreffl (2008), deren Ergebnisse als Referenzdatenbank für die vorliegende Berechnungsarbeit dienen, bestand darin, die aerodynamischen Leistungen einer Fahrzeugkonfiguration abzuschätzen, die den instationären Effekten eines Überholprozesses von PKW und LKW ausgesetzt waren. Die aus dieser Studie zur Verfügung gestellten Ergebnisse umfassen ein zeitabhängiges Strömungsfeld hinsichtlich der Oberflächendruckverteilung und der daraus resultierenden aerodynamischen Kräfte und Momente. Jungmann (2020) hat in seiner Doktorarbeit Messungen zur gerade- und Schräg-Anströmung, sowohl unter Bedingungen der stationären als auch der instationären Anströmung, eines isolierten DrivAer Automodells (Heft et al., 2012) experimentell untersucht. Die relevante Messkampagne beschäftigte sich ebenso mit einem sehr aufwendigen Überholungsereignis in dem eine BMW Limousine und ein langer Lastwagen involviert waren.

Die numerischen Simulationen haben im Vergleich mit Windkanalmessungen einen wesentlichen Vorteil: Mit numerischen Simulationen lassen sich beliebige physikalische Größen an allen Stellen des zu untersuchenden Körpers anzeigen. Man kann das ganze Geschwindigkeitsfeld und die Druckverteilung untersuchen. Die Stromlinien zeigen die Ablösungen am Fahrzeug; im Totwasser ist sichtbar, was für Verwirbelungen sich dort befinden. Die Kräfte und Momente, die auf das Fahrzeug wirken, lassen sich ebenfalls auswerten (vgl. Hucho 2005: 987). Manche numerischen Verfahren basieren auf „Finite Volume Method“. Dabei wird ein numerisches Gitter benötigt. In jeder Zelle sind dann die vereinfachten Navier-Stokes Gleichungen gelöst. Die Navier-Stokes Gleichungen beschreiben die Strömung. Wie sie vereinfacht werden, hängt von dem Turbulenzmodell ab. Die Vereinfachung durch Anwendung von Turbulenzmodell ist eine Sache, es ist dann aber auch wichtig wie viel Gleichungen bei dem eigenen Turbulenzmodell gelöst werden müssen. Heutzutage wird in der Automobilindustrie oft mit dem $k - \epsilon$ RANS Modell gerechnet. Mit zunehmenden Rechenressourcen werden LES Simulationen immer häufiger angewendet.

Aufgrund der Unfähigkeit der RANS Modelle, jegliche spektrale Dynamik einer hoch instationären turbulenten Strömung zu erfassen, ist es jedoch besonders ungeeignet, die Grenzschichtablösung an komplexen, variabel

gekrümmten Oberflächen, wandgebundenen und freien Wiederanlegungen und insbesondere in den Nachlaufbereichen zu simulieren. Die hoch instationären, separierenden Scherschichten und die Strömung in dem Fahrzeugnachlauf sind durch organisierte, großräumige kohärente Strukturen gekennzeichnet, die sich in der unmittelbaren Nähe des Bodens entwickeln. Eine Strömung mit hoher Reynoldszahl an einem in Bodennähe fahrenden Auto ist ein Paradebeispiel für eine solche Strömungskonfiguration, die einen hohen Grad an Komplexität aufweist, einschließlich einer Vielzahl von mittleren Strömungs- und Turbulenzphänomenen und deren Wechselwirkungen. Dementsprechend sind komplexere Turbulenzmodelle für eine zuverlässige Beschreibung des aerodynamischen Verhaltens eines Fahrzeugs erforderlich. Eine korrekte Erfassung der Dynamik der oben genannten kohärenten Wirbel, die die aerodynamischen Eigenschaften einer Fahrzeugkonfiguration erheblich beeinflusst, kann nur mit einem wirbelauflösenden LES-relevanten Turbulenzmodell erreicht werden. Relevante Berechnungsmethoden unter Verwendung eines entsprechend modifizierten RANS-Modells, das die Dynamik von nicht-aufgelösten residualen Turbulenzen in der sogenannten hybriden LES / RANS-Berechnungsstrategie beschreibt, wurden in der CFD-Community verstärkt eingesetzt, auch zur Simulation der Aerodynamik externer Fahrzeuge. siehe z.B. numerische Studien von Islam et al. (2009), Han et al. (2013), Frank et al. (2013), Guilmineau (2014), Gaylard et al. (2014), Jakirlic et al. (2014, 2016a, 2016b, 2017d), Ashton und Revell (2015a, 2015b), Ashton et al. (2016), Krajnovic et al. (2016), Jungmann et al. (2016), Islam and Thornber (2017), John et al. (2018) und Jungmann (2020). Es wurde über eine Reihe relevanter Vorschläge zur Kopplung von RANS- und LES-Ansätzen berichtet. Die relevanten hybriden Modelle wurden von Spalart et al. (1997; DES - Detached Eddy Simulation; siehe auch Spalart, 2009, für einige wichtige Verbesserungen der ursprünglich formulierten DES-Methode wie Delayed DES und Improved Delayed DES), Girimaji (2006) and Basara et al. (2011; PANS - partiell gemittelte Navier Stokes'sche Methode; stellt die in der vorliegenden Arbeit eingesetzte Methode) und Menter und Egorov (2010; SAS - Scale Adaptive Simulations). Die letztere Methodik ermöglicht die geeignete Erweiterung eines RANS-Modells auf dem Konzept der Wirbelzähigkeit, um als gitterabstandsfreie Modellformulierung zu fungieren, die die instationären turbulenten Strukturen auflöst. Darüber hinaus ist das Very LES (VLES) -Modell, das auf dem entsprechend sensibilisierten RNG-Typ des Wirbelviskositätsmodells basiert und die Grundlage der transienten Simulationen innerhalb der Lattice-Boltzmann-Methodik (LBM) darstellt, in verschiedenen Automobilanwendungen weit verbreitet, siehe z.B. Kotapati et al. (2009). Die vorteilhaftesten sind die nahtlosen hybriden LES / RANS-Methoden unter Verwendung eines entsprechend modifizierten RANS-Modells, das im gesamten Lösungsbereich die Rolle eines Sub-Grid-Scale-Modells (SGS) spielt, siehe beispielsweise Fröhlich und Terzi (2008) und Jakirlic und Maduta (2015) für einen relevanten Überblick.

Die Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen Windkanalmessungen und numerischen Verfahren ist aus Sicht der numerischen Verfahren stark von dem angewandten Turbulenzmodell abhängig. In der Forschung geht es darum, ein Berechnungsverfahren zu entwickeln, das eine genaue Übereinstimmung mit dem Experiment aufweist. In der Fahrzeugentwicklung geht es aber hauptsächlich darum, wie sich die lokalen Designänderungen auswirken. Die Ergebnisse müssen auch schnell produziert werden. In diesem Fall lohnt es sich doch die einfachen RANS Turbulenzmodelle anzuwenden. Zwar weisen sie, wie der vorherigen Diskussion zu entnehmen ist, eine nicht so gute Übereinstimmung mit der Windkanalmessung auf, sind jedoch in der Lage, quantitative Änderungen darzustellen. Was die komplette Umströmung des Fahrzeugs betrifft, sind an dieser Stelle die hybriden RANS-LES Modelle oder die LES Simulation geeignet. Diese Modelle brauchen aber eine einwandfreie Funktionalität ein feines Gitter, was sich wiederum in etwas längeren Rechenzeiten widerspiegelt. Aber mit ausreichenden Rechenressourcen, die die Fahrzeughersteller meistens im Rahmen mehrerer hunderter Prozessoren fast standardmäßig zur Verfügung haben, lassen sich auch diese Berechnungen in angemessener Rechenzeit durchführen. Ergebnisse aus diesen Berechnungen weisen dann in der Regel eine sehr gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus dem Windkanal auf.

Trotzdem muss man aber bei numerischen Verfahren immer mit numerischen Fehlern rechnen. Eine Strömungssimulation ist und bleibt immer eine Approximation der Realität; die direkte Lösung der Navier-Stokes Gleichungen ist bei der aktuellen Entwicklung der Rechengeschwindigkeit von Rechenmaschinen für lange Zeit noch nicht möglich (vgl. Hucho 2005: 1015).

Die Komplexität der Autoumströmung, insbesondere unter hoch instationären turbulenten Bedingungen, wie im Fall der Überholvorgänge anzutreffen ist, sowie die große Aktualität der wirbelauflösenden hybriden RANS/LES Modellen, stellt die Motivation der vorliegenden Arbeit dar. Dementsprechend konzentriert sich die Arbeit auf die Bewertung der Leistungsfähigkeiten der PANS-Modellierungsstrategie in einer intensiven Berechnungskampagne auf der Grundlage der Simulationen unterschiedlicher Autokonfiguration, sowohl einzeln betrachtet, als auch im Rahmen mehrerer Überholprozesse. Die PANS-Methode, die in Verbindung mit

den universellen Wandfunktionen angewandt wurde, stellt eine nahtlose, skalenauflösende Methode dar, die einen nahtlosen Übergang von instationärem RANS zur LES ermöglicht, basiert auf der dynamischen Variation des sog. „*resolution parameter*“. Der Parameter wird bewertet, indem die Längenskala, die sich auf die residuale Turbulenz der PANS-Methode bezieht, in Verhältnis zur relevanten Gitterweite gebracht wird. Die Dynamik der residualen turbulenten Fluidbewegung wird durch ein entsprechend modifiziertes, RANS-basiertes vier-Gleichungs-Modell beschrieben (Hanjalic et al., 2004). Simultan zu den hier behandelten Fahrzeugen wurde eine Reihe von vergleichenden Berechnungen durchgeführt, fokussiert auf die aerodynamischen Eigenschaften unterschiedlicher Konfigurationen des inzwischen sehr populär gewordenen „DrivAer“ Automodells (Heft et al., 2012), in Bezug auf die Heck Form, Räderrotation und Geometrie des Unterbodens, Jakirlic et al. (2016a, 2016b, 2017d). Dabei wurden auch andere wirbelaflösende Modelle, wie Very LES (Chang et al., 2014) sowie unterschiedliche DES Upgrades angewandt. Im Rahmen einer vorangegangenen Doktorarbeit (siehe Chang et al, 2015a, sowie Chang, 2015b), auch mit dem AVL-FIRE Code durchgeführt, wurden die prädiktiven Leistungsfähigkeiten der PANS Methode anhand vieler generischer Strömungsfälle (Abnahme der homogenen isotropen Turbulenz, Kanalströmungen, an den gekrümmten kontinuierlichen Wänden abgelöste Strömungen und verdrallte Strömungen) ausführlich untersucht und im Vergleich mit der umfangreich vorhandenen Referenzdatenbasis entsprechend diskutiert.

1.2. Struktur der Arbeit, Vorgehensweise

Nach den einleitenden, den Stand der relevanten Arbeiten und die Motivation aufführenden Abschnitten, wurden die Grundlagen der Strömungsmechanik und Turbulenzbeschreibung sowie deren Modellierung, deren assoziierte numerische Behandlung und schließlich die Grundlagen der Fahrzeugaerodynamik kompakt dargestellt.

Im **Kapitel 3** wird ein vereinfachtes Modell des BMW 5er Reihe im Maßstab 1:2,5 untersucht. Die „Vereinfachung“ bezieht sich auf eine glatte Unterbodengeometrie sowie auf die vollen, nicht-rotierenden Räder. Ein solch vereinfachtes Modell stellt eine gute Ausgangsbasis für die Belange der ansonsten sehr aufwendigen Gittergenerierung dar. Das das Fahrzeugmodell umfassende Rechengebiet hat die Form eines regulären Hexaeders. Die Studie wurde mit dem Ziel durchgeführt, entsprechende Gitteranordnung, die Gesetzmäßigkeit und Intensität der Gitterverfeinerung insbesondere bei der Annäherung an die Fahrzeugoberfläche sowie im Nachlaufgebiet zu testen. Weil dieses vereinfachte Modell wenige Anbauteile und Details enthält, ist die Anzahl von Gitterzellen geringer, was sich auf den Rechenaufwand positiv auswirkt. Solch eine Simulation lässt sich relativ schnell durchführen und bietet eine gute Übersicht. Die Ergebnisse von diesen Simulationen sind nicht für eine direkte Validierung mit dem Experiment geeignet; obwohl sie unter den gleichen operativen Bedingungen (bzg. der Anströmung) wie im Fall der ausführlichen Fahrzeuggeometrie (Kapitel 4) durchgeführt wurden, sind jedoch für die Gitterstudie hinsichtlich des zu verwendenden Diskretisierung-Verfahrens sowie der einzusetzenden Turbulenzmodelle von großer Wichtigkeit. Anschließend wird ein Gitter ausgewählt, das möglichst wenig Zellen beinhaltet, aber zugleich vorteilhaft ist für die Gewinnung entsprechend korrekter Ergebnisse der aerodynamischen Koeffizienten.

Mit der aus dieser Studie gewonnen Erfahrung bzg. der Gittereinstellung wird dann ein isoliert stehendes detailliertes Modell des BMW 5er im Maßstab 1:2,5 vernetzt und anschließend im **Kapitel 4** simuliert. Die Ergebnisse aus diesen Simulationen werden anhand der Ergebnisse der im BMW Windkanal in Aschheim/München durchgeführten Messkampagne von Schreffl (2008; Dissertation, FG SLA, Technische Universität Darmstadt) validiert. Dabei wurden Strömungssituationen ohne und mit der Grenzschichtabsaugung berücksichtigt. Das Letztere wird durch passende Randbedingungen realisiert. Es wurden weiterhin zwei unterschiedliche Formen des zu behandelnden Rechengebietes angewandt: zum einen wurde die Form des regulären, durch die Symmetrieebenen begrenzten Hexaeders (wie im Kapitel 3) adoptiert, wie es bei aerodynamischen Fahrzeugsimulationen üblich ist, und zum anderen wurde ein an die exakte Windkanalkonfiguration mit realistischen Abmessungen angepasstes Strömungsgebiet ausgelegt. Die numerisch gewonnenen Ergebnisse wurden mit den experimentell ermittelten Druckbeiwerten über die gesamte Fahrzeugoberfläche sowie Verläufen der drei charakteristischen aerodynamischen Beiwerte, bezogen auf die Widerstands-, Auftriebs- und die Seitenkraft, verglichen und ausführlich diskutiert. Vorher wurde unter anderem auch die Simulation des leeren Windkanals durchgeführt und mit den Druckmessungen verglichen.

Kapitel 5 behandelt den sog. „quasi-stationären“ Überholvorgang in dem die Windkanalmessungen (Schreffl, 2008) von der Umströmung einer PKW-LKW-Anordnung durchgeführt wurden, die durch acht statische, fixe Positionen des PKW relativ zum LKW nachgebildet wurden. Dabei generiert der LKW einen instationären

Nachlauf, der den PKW anströmt. Das die beiden Fahrzeuge umfassende Rechengebiet entsprach, wie im Kapitel 4 bereits verwendet, dem exakten, für die Messung verwendeten Windkanal. Die Berechnungen für jede einzelne Position wurden durchgeführt und die gewonnenen Ergebnisse wurden, analog zu den im Kapitel 4 aufgeführten experimentellen Referenzdaten, verglichen und entsprechend ausführlich diskutiert.

Kapitel 6 beschäftigt sich mit der Simulation von einem dynamischen Überholvorgang des LKWs durch den PKW, in dem sich zuerst nur PKW an dem stehenden LKW vorbei bewegt. Um die korrekte relative PKW-zum-LKW Geschwindigkeit sicherzustellen, hat sich dabei die Luft entgegen der PKW-Richtung mit der, in der realen Situation gegebenen LKW-Geschwindigkeit bewegt. Die operativen Bedingungen dieses modellierten Überholmanövers (gleiche Modellfahrzeuge aus dem Kapitel 5 wurden herangezogen), das der Straßenmessung von realen Fahrzeugen von Schreffl (2008) entspricht, wurden durch Anwendung des dynamischen Ähnlichkeitskonzeptes in Bezug auf die Reynoldszahl-Konsistenz bestimmt. Anschließend wurde auch die Simulation von beiden fahrenden Fahrzeugen durchgeführt. Die Bewegung der Fahrzeuge wird nur durch ein sich bewegendes und entsprechend deformierendes Gitter ohne Anströmgeschwindigkeit dargestellt. Die Gitterbewegung wurde unter Beibehaltung der Gitterzellenanzahl realisiert, in dem zusätzlich die Raumerhaltungsgleichung im Einklang mit dem sog. „*space conservation law*“ gelöst wurde. Die experimentell bestimmten Ergebnisse zum Verlauf des Seitenkraftbeiwertes und relevanten Gier-Momentes dienten als Referenzdatenbasis für die Validierung der numerischen Modellierung.

Die Arbeit schließt mit dem **Kapitel 7**, in dem die wichtigsten Erkenntnisse zusammenfassend diskutiert wurden.

Alle Simulationen wurden primär mit der wirbelauflösenden PANS-Methode durchgeführt, deren residuale, nicht aufgelöste Turbulenz mit dem entsprechend modifizierten $k - \varepsilon - \zeta - f$ RANS Modell beschrieben wurde. Dieses auf der Durbin's (1991) „*Elliptic Relaxation Method - ERM*“ basierte Viergleichungs-Wirbelviskositätsmodell stellt ein wandnahes, numerisch entsprechend robustes Turbulenzmodell dar (Hanjalic et al., 2004). Das Modell wurde auch im Rahmen von reinen stationären und instationären RANS Berechnungen von allen mit PANS simulierten Fällen eingesetzt. So konnte eine umfangreiche numerische Datenbank zur Fahrzeugaerodynamik gewonnen werden, die durch detaillierten Vergleich mit der verfügbaren experimentellen Datenbasis validiert wurde. Alle Simulationen sind von den Analysen zur Abschätzung der Ergebnisqualität der aus der Sicht der eigentlichen numerischen Methode (wie z.B. der Genauigkeit der räumlichen und zeitlichen Diskretisierung samt der verwendeten Gitterauflösung und assoziierten Merkmale) sowie der korrekten Erfassung der Physik der Turbulenz (u.A., das Verhältnis der charakteristischen Gitterweite zum Kolmogorov'schen Längenmaßstab) begleitet. Ebenso wurden die Analysen der Recheneffizienz zu spezifischen Strömungsfällen bezüglich der benötigten Rechenzeit durchgeführt.

2. Theoretische Grundlagen

In diesem Kapitel wird zunächst auf die Grundlagen der Strömungsmodellierung und später auf die der Fahrzeugaerodynamik eingegangen.

2.1. Strömungsmechanik

In diesem Abschnitt werden die Zusammensetzung der Navier-Stokesschen Gleichungen und ihre Approximation für die turbulente Modellierung chronologisch beschrieben.

Aus der Bewegung am Ort \vec{x} bekommt man die Geschwindigkeit an einem benachbarten Ort $\vec{x} + d\vec{x}$ aus der Taylorreihen-Entwicklung (vgl. Spurk 2010: 19):

$$u_i(\vec{x} + d\vec{x}, t) = u_i(\vec{x}, t) + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} dx_j \quad (2.1)$$

Die Geschwindigkeitsgradienten $\partial u_i / \partial x_j$ bilden einen Tensor zweiter Ordnung, der sich in einen symmetrischen und in einen antisymmetrischen Tensor zerlegen lässt:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) + \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.2)$$

Der symmetrische Teil, der die Verzerrung des Elements bestimmt, nennt man Verzerrungstensor, oder auch Dehnungs- Deformationsgeschwindigkeitstensor (vgl. Spurk 2010: 19f):

$$s_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.3)$$

Der antisymmetrische Tensor stellt die Starrkörperbewegung dar. Man nennt ihn Drehgeschwindigkeitstensor (vgl. Spurk 2010: 19f):

$$\Omega_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.4)$$

Somit lässt sich die Gleichung (2.1) wie folgt umschreiben (vgl. Spurk 2010: 19f):

$$u_i(\vec{x} + d\vec{x}, t) = u_i(\vec{x}, t) + s_{ij} dx_j + \Omega_{ij} dx_j \quad (2.5)$$

In der Gleichung (2.5) ist erster Anteil die Translation der Flüssigkeit mit einer Geschwindigkeit u_i in der Nähe von dem Ort \vec{x} , der zweite Anteil ist die Deformation in der Umgebung von \vec{x} und der dritte Anteil ist dann die lokale Starrkörperrotation.

In der Kontinuumstheorie ist die Dichte eine stetige Funktion des Ortes. Die Masse m ist ein Integral der Dichte über den Bereich $(V(t))$ des eingeschlossenen Teils der Flüssigkeit zur Zeit t . Es ist ebenso auch eine Summe der Massenelemente dm über die Menge (M) der materiellen Punkte (vgl. Spurk 2010: 31):

$$m = \int_{(M)} dm = \iiint_{(V(t))} \rho(\vec{x}, t) dV \quad (2.6)$$

Dabei ist die Masse des eingeschlossenen Teils der Flüssigkeit zeitlich konstant:

$$\frac{Dm}{Dt} = 0 \quad (2.7)$$

Nach (2.6) und (2.7) nimmt die Gleichung der Erhaltung der Masse in einem festen Bereich (V) folgende Form an (vgl. Spurk 2010: 37):

$$\frac{D}{Dt} \iiint_{(V(t))} \rho dV = \iiint_{(V)} \left[\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) \right] dV = 0 \quad (2.8)$$

Diese Gleichung gilt bei jedem beliebigen Integrationsbereich (V) , die differentielle Form des Erhaltungssatzes der Masse ist dann (vgl. Spurk 2010: 37):

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2.9)$$

Man nennt diese Gleichung die Kontinuitätsgleichung (vgl. Spurk 2010: 37).

Wenn sich die Dichte ρ im Laufe seiner Bewegung nicht ändert $D\rho/Dt = 0$, spricht man über inkompressible Strömung. Wenn die Dichte überall konstant ist, ist die Strömung homogen (vgl. Spurk 2010: 38).

Der Impulssatz lautet: „In einem Inertialsystem ist die zeitliche Änderung des Impulses eines Körpers gleich der auf diesen Körper wirkenden Kraft.“ (Spurk 2010: 39) Man rechnet den Impuls ähnlich wie bei (2.6) als Integral über den Bereich $(V(t))$ des eingeschlossenen Teils der Flüssigkeit (vgl. Spurk 2010: 39):

$$\dot{\vec{I}} = \iiint_{(V(t))} \rho \vec{u} dV \quad (2.10)$$

Bei den an Flüssigkeit wirkenden Kräften unterscheidet man zwischen Massen- bzw. Volumenkräften und Oberflächen- bzw. Kontaktkräften. Die Massenkraft \vec{k} wirkt auf alle Teilchen des Körpers. Die unmittelbare Umgebung wirkt mittels Oberflächenkräfte auf die Oberfläche der betrachteten Flüssigkeit; so ergibt sich der Spannungsvektor \vec{t} . Die gesamte Kraft, die auf die Flüssigkeit wirkt, bekommt man durch Integration über Flüssigkeits- Volumen und Oberfläche (vgl. Spurk 2010: 39 und 41):

$$\vec{F} = \iiint_{(V(t))} \rho \vec{k} dV + \iint_{(S(t))} \vec{t} dS \quad (2.11)$$

Dann sieht der Impulssatz im zeitlich veränderlichen Bereich bzw. im festen Bereich so aus (vgl. Spurk 2010: 41):

$$\frac{D}{Dt} \iiint_{(V(t))} \rho \vec{u} dV = \iiint_{(V)} \frac{D\vec{u}}{Dt} \rho dV = \iiint_{(V)} \vec{k} \rho dV + \iint_{(S)} \vec{t} dS \quad (2.12)$$

Da der Spannungsvektor \vec{t} außer dem Ort \vec{x} und der Zeit t auch von dem Normalenvektor \vec{n} des Flächenelements abhängig ist, entsteht dadurch ein Tensor zweiter Stufe τ_{ji} (vgl. Spurk 2010: 43):

$$t_i(\vec{x}, \vec{n}, t) = \tau_{ji}(\vec{x}, t) n_j \quad (2.13)$$

Die Elemente an der Hauptdiagonale des Spannungstensors τ_{ji} sind die Normalspannungen, die Nichtdiagonalelemente sind die Schubspannungen.

Jetzt wenn man in den Impulssatz (2.12) den Ausdruck (2.13) von dem Spannungsvektor t_i einsetzt, bekommt man den Impulssatz in folgender Form (vgl. Spurk 2010: 45):

$$\iiint_{(V)} \left(\rho \frac{Du_i}{Dt} - \rho k_i - \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} \right) dV \quad (2.14)$$

Bei der Voraussetzung des beliebigen Integrationsbereichs (V) , ist das seine Differentialform:

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho k_i + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} \quad (2.15)$$

Der Drallsatz bzw. Drehimpulssatz lautet: Die zeitliche Änderung des Dralles ist im Inertialsystem gleich dem auf Körper wirkenden Moment der äußeren Kräfte (vgl. Spurk 2010: 47):

$$\frac{D}{Dt} (\vec{D}) = \vec{M} \quad (2.16)$$

Man bekommt den Drall, der auf den Ursprung des Koordinatensystems bezogen ist, durch Integration über den Bereich $(V(t))$ der Flüssigkeit (vgl. Spurk 2010: 47):

$$\vec{D} = \iiint_{(V(t))} \vec{x} \times (\rho \vec{u}) dV \quad (2.17)$$

Das durch den Drall verursachte Moment, das sich ebenso auf den gleichen Bezugspunkt bezieht, ist dann (vgl. Spurk 2010: 47):

$$\vec{M} = \iiint_{(V(t))} \vec{x} \times (\rho \vec{k}) dV + \iint_{(S(t))} \vec{x} \times \vec{t} dS \quad (2.18)$$

Bei einem gemeinsamen Bezugspunkt bekommt der Drallsatz folgende Form (vgl. Spurk 2010: 47):

$$\frac{D}{Dt} \iiint_{(V(t))} \vec{x} \times (\rho \vec{u}) dV = \iiint_{(V)} \vec{x} \times (\rho \vec{k}) dV + \iint_{(S)} \vec{x} \times \vec{t} dS \quad (2.19)$$

Da der Drall aber von dem Bezugspunkt unabhängig ist, bekommt der Impulssatz nach Einführung von (2.13) folgende Differentialform (vgl. Spurk 2010: 48):

$$\iiint_{(V)} \varepsilon_{ijk} \tau_{jk} dV = 0 \quad (2.20)$$

Dabei ist der Spannungstensor τ_{jk} symmetrisch und stetig; es gilt (vgl. Spurk 2010: 48):

$$\tau_{jk} = \tau_{kj} \quad (2.21)$$

Alle Körper verhalten sich nach den universalen Bilanzsätzen. Allein diese Gesetze sind nicht ausreichend um das Verhalten vollständig zu beschreiben. Deformierbares Medium muss durch sein Material charakterisiert werden. In den Bilanzsätzen wird dadurch der Spannungs- und der Wärmestromvektor von anderen Feldgrößen abhängig (vgl. Spurk 2010: 81 und 82).

Die für diese Arbeit relevanten „mechanischen“ Bilanzsätze werden an dieser Stelle noch mal zusammengefasst:

$$\text{- Masse } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (2.9)$$

$$\text{- Impuls } \rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho k_i + \frac{\partial \tau_{ji}}{\partial x_j} \quad (2.15)$$

$$\text{- Drehimpuls } \tau_{ij} = \tau_{ji} \quad (2.21)$$

Dabei sind sechs Materialgleichungen nötig, um das Gleichungssystem mit den Unbekannten ρ , u_i und τ_{ij} zu lösen. Die Materialgleichung, die aus den Bilanzsätzen abgeleitet wurde, stellt für eine viskose Flüssigkeit einen linearen Zusammenhang zwischen dem Spannungstensor τ_{ij} und dem Deformationsgeschwindigkeitstensor s_{ij} dar (vgl. Spurk 2010: 83):

$$\tau_{ij} = -p\delta_{ij} + \lambda^* s_{kk}\delta_{ij} + 2\mu s_{ij} \quad (2.22)$$

Aus (2.22) geht hervor, dass der Spannungstensor τ_{ij} nur von dem Druck p , von dem Deformationsgeschwindigkeitstensor s_{ij} und nicht von dem Drehgeschwindigkeitstensor Ω_{ij} abhängig ist.

Den Spannungstensor kann man auch wie folgt zerfallen (vgl. Spurk 2010: 44):

$$\tau_{ij} = -p\delta_{ij} + P_{ij} \quad (2.23)$$

Dabei ist der Reibungsspannungstensor P_{ij} definiert als (vgl. Spurk 2010: 84):

$$P_{ij} = \lambda^* s_{kk}\delta_{ij} + 2\mu s_{ij} \quad (2.24)$$

Die Reibungsspannungen sind durch den Tensor der Dehnungsgeschwindigkeiten s_{ij} gegeben und sind nicht vom Ort \vec{x} abhängig. Die Spannung am Teilchen ist nur vom augenblicklichen Deformationsgeschwindigkeitstensor abhängig, die Deformationsvorgeschichte beeinflusst es nicht.

Bei dem Spannungstensor τ_{ij} repräsentieren die Elemente an der Hauptdiagonale die Normalspannungen und die Nichtdiagonalelemente die Schubspannungen. Wenn eine Flüssigkeit in Ruhe ist, sind alle Reibungsspannungen gleich null; das heißt $s_{ij} = 0$. Der Spannungstensor reduziert sich auf (vgl. Spurk 2010: 44):

$$\tau_{ij} = -p\delta_{ij} \quad (2.25)$$

Diesen Spannungszustand nennt man hydrostatisch. Dabei entspricht die mittlere Normalspannung dem negativen Druck (vgl. Spurk 2010: 44f):

$$\bar{p} = \frac{1}{3} \tau_{ii} \quad (2.26)$$

In der Materialgleichung (2.22) sind neben dem Druck die zwei weiteren Skalargrößen λ^* , μ als Volumen- bzw. Scherviskosität bekannt. Sie beschreiben den thermodynamischen Zustand des Materials (vgl. Spurk 2010: 84).

Die Scherzähigkeit (Scherviskosität) nennt man dynamische Viskosität; dividiert durch die Dichte ρ bekommt man die kinematische Viskosität (kinematische Zähigkeit), die abhängig von der Dichte bzw. von dem Druck ist (vgl. Spurk 2010: 85):

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (2.27)$$

Was die Temperaturabhängigkeit der Zähigkeit tropfbarer Flüssigkeiten betrifft, bei zunehmender Temperatur sinkt die Zähigkeit exponentiell, wobei bei Gasen steigt sie.

Wenn man die Zähigkeit zusammen mit der Strömungsgeschwindigkeit U_∞ , der Dichte ρ und mit der charakteristischen Länge L des umströmten Körpers betrachtet, bekommt man eine dimensionslose Größe, die als Reynolds-Zahl bekannt ist (vgl. Spurk 2010: 85ff):

$$Re = \frac{U_\infty L \rho}{\mu} = \frac{U_\infty L}{\nu} \quad (2.28)$$

Die Reynolds-Zahl ist eine von den wichtigsten Größen in Strömungsmechanik. Sie stellt den Einfluss der Zähigkeit dar. Wenn μ klein ist, ist Re groß; man spricht über eine reibungsfreie Strömung.

An dieser Stelle ist noch wichtig zu sagen, dass der Widerstandsbeiwert c_W auch von der Reynolds-Zahl abhängig ist (vgl. Spurk 2010: 87).

$$c_W = c_W(Re) \quad (2.29)$$

Navier-Stokessche Gleichungen

Annahme für die Navier-Stokesschen Gleichungen ist die Newtonsche Flüssigkeit; wenn man die Materialgleichung (2.22) und den Deformationsgeschwindigkeitstensor (2.3) in die Impulsgleichung (2.15) einsetzt, bekommt man die Navier-Stokesschen Gleichungen in Form (vgl. Spurk 2010: 103):

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho k_i + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(-p + \lambda^* \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2.30)$$

Bei Vernachlässigung der Temperaturabhängigkeit von μ und λ^* sehen die Navier-Stokesschen Gleichungen so aus (vgl. Spurk 2010: 105):

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho k_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + (\lambda^* + \mu) \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\partial u_k}{\partial x_k} \right) + \mu \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) \quad (2.31)$$

Für eine inkompressible Strömung, bei der $u_k/x_k = 0$ gilt, reduzieren sich die Navier-Stokessche Gleichungen auf (vgl. Spurk 2010: 105):

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho k_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_k \partial x_k} \quad (2.32)$$

Auswirkung von der Abhängigkeit der Reynolds-Zahl lässt sich durch die kritische Reynolds-Zahl beobachten. Unter dieser kritischen Reynolds-Zahl spricht man über laminare Strömung. Wenn die Zähigkeit genug niedrig wird, überschreitet die Reynolds-Zahl ihren kritischen Wert, es bildet sich ganz andere Strömung aus, die man als turbulent bezeichnet. Diese turbulente Strömung ist dreidimensional, rotationsbehaftet und instationär, die Geschwindigkeit an einem Ort schwankt um einen Mittelwert. Berechnung von turbulenten Strömungen durch

direkte numerische Simulation ist so rechenintensiv, dass man lieber an halbempirischen Näherungsmethoden zugreift, die aber nur die Mittelwerte der Strömungsgrößen liefern können.

Die Navier-Stokesschen Gleichungen lassen sich erst lösen, wenn sie durch Einnahme der Reynolds-Zahl gleich null oder unendlich vereinfacht werden. Umso bessere Ergebnisse liefern dann auch die Näherungslösungen (vgl. Spurk 2010: 111).

Eulersche Gleichungen

Aus der Navier-Stokesschen Gleichung (2.31) entsteht eine Eulersche Gleichung wenn die $Re \rightarrow \infty$ geht, dann verschwinden die Reibungskräfte, man spricht über reibungsfreie Strömung (vgl. Spurk 2010: 115).

$$\rho \frac{Du_i}{Dt} = \rho k_i - \frac{\partial p}{\partial x_i} \quad (2.33)$$

Reynoldssche Mittelung

Turbulente Strömung kann man sich wie eine Hauptströmung mit einer chaotischen Schwankungsgeschwindigkeit vorstellen. Eine Methode hat Reynolds im Jahre 1895 vorgestellt, wo alle Größen als eine Summe vom Haupt- und Fluktuationsteil dargestellt sind. Dies wird dann in der Kontinuitätsgleichung und in den Navier-Stokesschen Gleichungen eingesetzt (vgl. Wilcox 1994: 11).

Man unterscheidet zwischen drei Reynoldsschen Mittelungen; es gibt die zeitliche, räumliche und ensemble Mittelung (vgl. Wilcox 1994: 11).

Räumliche Mittelung benutzt man bei der homogenen Turbulenz, wo der Mittelwert der turbulenten Strömung in allen Richtungen gleich ist (vgl. Wilcox 1994: 12).

$$\bar{\phi}_i(t) = \lim_{V \rightarrow \infty} \frac{1}{V} \iiint f(x_j, t) dV \quad (2.34)$$

Zeitliche Mittelung ist für eine stationäre Turbulenz geeignet, das heißt für turbulente Strömung deren Mittelwert sich nicht mit der Zeit ändert. Die zeitliche Mittelung $\bar{\phi}(x)$ von der Variable $\phi(x, t)$ der augenblicklichen Strömung ist wie folgt definiert (vgl. Spurk 2010: 224):

$$\bar{\phi}_i(x_j) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \phi_i(x_j, t) dt \quad (2.35)$$

Die ensemble Mittelung beschreibt eine Mittelung durch eine Reihe von n Strömungsabläufen am selben Ort x_j zur selben Zeit t und wird bei einer instationären Hauptströmung benutzt (vgl. Spurk 2010: 224):

$$\bar{\phi}_i(x_j, t) = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \phi_i^{(k)}(x_j, t) \quad (2.36)$$

Für eine turbulente Strömung, die sowohl stationär als auch homogen ist, sind alle diese drei Mittelungen gleich. In der Ingenieurpraxis handelt es sich meistens um eine nicht homogene Turbulenz, deswegen ist die Zeitliche Mittelung am meisten benutzte Reynoldssche Mittelung.

Die augenblickliche Geschwindigkeit $u_i(x, t)$ einer stationären Strömung zerlegt man auf Hauptgeschwindigkeit \bar{u}_i , die den Mittelwert der Geschwindigkeit darstellt, und auf viel kleinere Schwankungsgeschwindigkeit u'_i (vgl. Wilcox 1994: 12):

$$u_i(x_j, t) = \bar{u}_i(x_j, t) + u'_i(x_j, t) \quad (2.37)$$

Wenn man die Hauptgeschwindigkeit zeitlich mittelt, bekommt man wieder die gleiche zeitlich gemittelte Größe (vgl. Wilcox 1994: 12):

$$\bar{\bar{u}}_i(x) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \bar{u}_i(x) dt = \bar{u}_i(x) \quad (2.38)$$

Zeitliche Mittelung des fluktuierenden Anteils der Geschwindigkeit ist gleich Null (vgl. Wilcox 1994: 12):

$$\bar{\bar{u}}'_i = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_t^{t+T} [u_i(x, t) - \bar{u}_i(x)] dt = \bar{u}_i(x) - \bar{\bar{u}}_i(x) = 0 \quad (2.39)$$

Diese Reynoldssche Mittelung gilt auch für Skalargrößen (vgl. Wilcox 1994: 14):

$$\text{Zerlegung des Druckes: } p = \bar{p} + p' \quad (2.40)$$

$$\text{Zerlegung der Temperatur: } T = \bar{T} + T' \quad (2.41)$$

Reynoldssche gemittelte Gleichungen

Für die Vereinfachung betrachtet man inkompressible Strömung. Man geht von der Kontinuitätsgleichung und von den Navier-Stokesschen Gleichungen (Impulsgleichungen) aus. Nach der zeitlichen Mittelung bekommt man die Gleichungen in Form (vgl. Spurk 2010: 224):

Die Mittelung der Kontinuitätsgleichung ist dann:

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial(\bar{u}_i + u'_i)}{\partial x_i} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial u'_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.42)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_i} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} + \frac{\partial \bar{u}'_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.43)$$

Danach bekommt man die gemittelte Kontinuitätsgleichung für den gemittelten Wert in Form (vgl. Spurk 2010: 225):

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.44)$$

und für den Schwankungswert dann (vgl. Spurk 2010: 225):

$$\frac{\partial u'_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.45)$$

Die Mittelung der Navier-Stokesschen Gleichungen sieht dann so aus:

$$\rho \frac{\partial u_i}{\partial t} + \rho u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (2.46)$$

$$\rho \frac{\partial(\bar{u}_i + u'_i)}{\partial t} + \rho(\bar{u}_j + u'_j) \frac{\partial(\bar{u}_i + u'_i)}{\partial x_j} = -\frac{\partial(\bar{p} + p')}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial(\bar{u}_i + u'_i)}{\partial x_j} \right) \quad (2.47)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} + \rho \overline{u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \rho \overline{u'_j} \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \overline{p'}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} \right) \quad (2.48)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} + \rho \overline{u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \rho \overline{u'_j} \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} - \frac{\partial \overline{p'}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \overline{u'_i}}{\partial x_j} \right) \quad (2.49)$$

Nach den Mittelungsregeln bekommt man schließlich die Reynoldsschen Gleichungen in Form (vgl. Spurk 2010: 225):

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (2.50)$$

Die Reynoldssche Gleichungen (2.50) zusammen mit der Kontinuitätsgleichung (2.44) bestimmen die Hauptströmung nicht vollständig. Nach der Mittelung sind die gemittelten Impulsflüsse $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ immer unbekannt. Diese Terme nennt man als Reynoldssche Spannungen. Der Tensor dieser Spannungen ist symmetrisch, deswegen gilt für ihn (vgl. Spurk 2010: 227):

$$\bar{\tau}_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} \quad (2.51)$$

$$\overline{u'_i u'_j} = \overline{u'_j u'_i} = \begin{pmatrix} \overline{u'_1 u'_1} & \overline{u'_1 u'_2} & \overline{u'_1 u'_3} \\ \overline{u'_2 u'_1} & \overline{u'_2 u'_2} & \overline{u'_2 u'_3} \\ \overline{u'_3 u'_1} & \overline{u'_3 u'_2} & \overline{u'_3 u'_3} \end{pmatrix} \quad (2.52)$$

Reynoldssche Spannungen sind in der Hauptströmung viel größer als die Reibungsspannungen $\mu \partial^2 u_i / (\partial x_j \partial x_j)$ und wirken wie eine zusätzliche Volumenkraft. In der Wandnähe gehen die Schwankungsgeschwindigkeiten und damit auch die Reynoldssche Spannungen gegen null. Dann in dieser Zone überwiegen die Reibungsspannungen und man nennt sie als viskose Unterschicht.

Damit das Gleichungssystem der gemittelten Kontinuitätsgleichung und der Reynoldschen Gleichungen erhalten bleibt, fehlt noch die Gleichung für die Schwankungsbewegung. Die bekommt man, wenn man von der zerlegten Navier-Stokesschen Gleichung die Reynoldsche Gleichung subtrahiert (vgl. Spurk 2010: 227).

$$\rho \frac{\partial u'_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_k \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} + \rho u'_k \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} + \rho u'_k \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\mu \frac{\partial u'_i}{\partial x_k} + \rho \overline{u'_i u'_k} \right) \quad (2.53)$$

Wenn man zu dieser Gleichung eine äquivalente Gleichung, wo i und j vertauscht sind, addiert und mit u'_j multipliziert, bekommt man so genannte Reynoldssche-Spannungsgleichung (vgl. Kozubková/Drábková 2003: 15):

$$\frac{\partial \tau_{ij}}{\partial t} + \bar{u}_k \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} = -\tau_{ik} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_k} - \tau_{jk} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_k} + 2\mu \frac{\partial u'_i \partial u'_j}{\partial x_k \partial x_k} - p' \left(\frac{\partial u'_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u'_j}{\partial x_i} \right) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\nu \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_k} + \rho \overline{u'_i u'_j u'_k} + \overline{p' u'_i} \delta_{jk} + \overline{p' u'_j} \delta_{ik} \right] \quad (2.54)$$

Um das Gleichungssystem zu schließen, sind große Vereinfachungen und Hypothesen nötig. Turbulenzmodelle stellen eine Beziehung zwischen den auftretenden Spannungen und dem mittleren Geschwindigkeitsfeld dar. Sie sind in Form von algebraischen Beziehungen oder auch von Differentialgleichungen, wo sie sich nach der Anzahl von diesen Gleichungen unterscheiden (vgl. Spurk 2010: 228).

2.2. Turbulenzmodellierung

In dieser Arbeit benutzte Turbulenzmodelle basieren auf der turbulenten kinetischen Energie und nutzen Boussinesqsche Wirbelviskosität-Approximation aus. Sie stellt eine Analogie zum Newtonschen Viskositätsgesetz dar, dass die turbulente Schubspannung direkt proportional zur mittleren Deformationsrate ist (vgl. Kozubková/Drábková 2003: 15):

$$\tau_{turb} = -\rho \overline{u'_1 u'_2} = \mu_T \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_2} \quad (2.55)$$

Nach der tensorischen Erweiterung für den allgemeinen Fall und der Erfüllung der Bedingung $\overline{u'_i u'_i} = 2k$ bekommt die Boussinesqsche Approximation eine Endformulierung (vgl. Wilcox 1994: 75):

$$\tau_{ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j} = \mu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k = 2\mu_T \bar{s}_{ij} - \frac{2}{3} \rho \delta_{ij} k \quad (2.56)$$

wo \bar{s}_{ij} der gemittelte Deformationsgeschwindigkeitstensor ist:

$$\bar{s}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.57)$$

und μ_T Koeffizient der turbulenten Viskosität ist. Sie ist keine physikalische Eigenschaft der Flüssigkeit, sondern der Strömung.

Anstatt der turbulenten Spannungen wird nun nur die turbulente Viskosität μ_T modelliert. Reynoldsche Gleichungen haben nach der Boussinesqschen Approximation folgende Form (vgl. Kozubková/Drábková 2003: 16):

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial}{\partial x_i} \left(\bar{p} + \frac{2}{3} k \right) + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \mu_T) \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \right] \quad (2.58)$$

Die Grundlagen sind durch Prandtl gelegt. Er setzt die Längenskala und die Geschwindigkeitsskala ein, wo die Geschwindigkeitsskala als fluktuierende turbulente kinetische Energie definiert ist (vgl. Wilcox 1994: 74):

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} = \frac{1}{2} (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2}) \quad (2.59)$$

Die turbulente Längenskala l ist eine typische Strömungsgröße. Dadurch lässt sich die turbulente Viskosität ausrechnen als (vgl. Wilcox 1994: 74):

$$\mu_T = C_k \rho k^{1/2} l \quad (2.60)$$

Dazu hat die Dissipation folgende Form (vgl. Wilcox 1994: 74):

$$\varepsilon = \nu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k}} \quad (2.61)$$

Es gilt auch eine Beziehung zwischen der Dissipation und der Längenskala; beide sind Funktionen der Turbulenz unabhängig von den Materialeigenschaften (vgl. Wilcox 1994: 76).

$$\varepsilon \sim \frac{k^{3/2}}{l} \quad (2.62)$$

Diese Beziehung ändert sich bei unterschiedlichen Turbulenzmodellen.

Aus der Reynoldsschen Spannungsgleichung, Gleichung (2.54), ergibt sich dann die exakte Transportgleichung für die turbulente kinematische Energie (vgl. Wilcox 1994: 74):

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \nu \overline{\frac{\partial u'_i}{\partial x_k} \frac{\partial u'_i}{\partial x_k}} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial k}{\partial x_j} - \frac{1}{2} \overline{\rho u'_i u'_i u'_j} - \overline{p' u'_j} \right] \quad (2.63)$$

In der Gleichung (2.63) stellt jedes Glied dar, wie sich die Turbulenz in der Strömung verhält. Der erste Term auf der linken Seite ist der Term der zeitlichen Ableitung, der zweite Term heißt Konvektionsterm. Diese beiden Terme stellen dar, wie sich die turbulente kinetische Energie ändert. Der erste Term rechts nennt man Produktionsterm, der repräsentiert, welche kinetische Energie von der Hauptströmung in die Turbulenz umgewandelt wird. Der nächste ist der Dissipationsterm, welcher sagt, welche turbulente kinetische Energie in die innere Wärmeenergie umgewandelt wird. Der Term, der $\mu \partial k / \partial x_j$ beinhaltet, heißt molekulare Diffusion, was bedeutet, welche turbulente Energie durch den molekularen Transport diffundiert. Dann kommt die dreifache Geschwindigkeitskorrelation als der turbulente Transport, die stellt dar, welche turbulente Energie durch die turbulenten Fluktuationen transportiert wird. Der letzte Term auf der rechten Seite heißt Druckdiffusion und repräsentiert einen turbulenten Transport verursacht durch die Korrelation zwischen den Druck- und Geschwindigkeitsfluktuationen. Um diese Gleichung zu schließen, muss man den Reynoldsschen Spannungstensor τ_{ij} feststellen (vgl. Wilcox 1994: 74f).

Die nächste Approximation findet statt, wenn man den turbulenten Transport und die Druckdiffusion addiert und wie ein Gradient des Transportprozesses darstellt (vgl. Wilcox 1994: 76):

$$\frac{1}{2} \overline{\rho u'_i u'_i u'_j} + \overline{p' u'_j} = - \frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_j} \quad (2.64)$$

wo σ_k ein Schließ-Koeffizient (Konstante) ist.

Schließlich bekommt man aus den Gleichungen (2.63) und (2.64) die Transportgleichung für die turbulente kinetische Energie (vgl. Wilcox 1994: 76):

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.65)$$

2.2.1. Ein-Gleichungsmodelle

Um die Ein-Gleichungsmodelle zu definieren, braucht man die Definition von der turbulenten Viskosität μ_T , von der Längenskala l und die Transportgleichung für die turbulente kinetische Energie (vgl. Jakirlic 2017a: 15):

$$\mu_T = \rho C_\mu l_m k^{1/2} \quad (2.66)$$

wo C_μ als eine Schließkonstante definiert ist:

$$C_\mu = \left(\frac{-\overline{uv}}{k}\right)^2 = 0,09 \quad (2.67)$$

und die Kolmogorov Längenskala gleich dem „mixing-length“ ist.

$$l \equiv l_m = \kappa y (1 - e^{-0,016y^*}) \quad (2.68)$$

Die Transportgleichung für die turbulente kinetische Energie hat dann folgende Form (vgl. Wilcox 1994: 77):

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \frac{k^{3/2}}{l} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + C_\mu l_m k^{1/2} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.69)$$

Die oben genannten Ein-Gleichungsmodelle bezeichnet man als „mixing-length“ Modelle. Die andere Gruppe bilden die Ein-Gleichungsmodelle, wo anstatt der Transportgleichung für die turbulente kinetische Energie die Transportgleichung für die kinematische turbulente Viskosität $\nu_T = \mu_T / \rho$ angewendet wird. Weil die turbulente Viskosität μ_T eine ausgedachte Größe ist, gibt es auch keine exakte Transportgleichung dafür. In der Gleichung (2.70) wird deswegen nur ein konkretes Beispiel aus dem Spalart und Allmaras Modell gezeigt (vgl. Wilcox 1994: 78ff):

$$\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial t} + \bar{u}_j \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} = c_{b1} \tilde{\nu} \tilde{\omega} - c_{\omega 1} f_\omega \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 + \frac{1}{\sigma} \frac{\partial}{\partial x_k} \left[(\nu + \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_k} \right] + \frac{c_{b2}}{\sigma} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_k} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_k} \quad (2.70)$$

Weil aber die Ein-Gleichungsmodelle zu viele Schließkonstanten und Dämpfungsfunktionen beinhalten und für konkrete Strömung angepasst werden müssen, sind sie mit einer stärkeren Ungenauigkeit belastet. Deswegen braucht man mehr universelle Turbulenzmodelle, die die so genannten Zwei-Gleichungsmodelle darstellen (vgl. Wilcox 1994: 82f).

2.2.2. Mehrgleichungsmodelle

Bei den Mehrgleichungsmodellen braucht man außer der turbulenten Viskosität μ_T , der Längenskala l und der Transportgleichung für die turbulente kinetische Energie, mindestens noch eine weitere Transportgleichung dazu. Damit sind diese Turbulenzmodelle geschlossen und können für beliebige Strömungssimulationen benutzt werden (vgl. Wilcox 1994: 83).

$k - \varepsilon$ Modell

Das $k - \varepsilon$ Modell ist das bekannteste Zwei-Gleichungsmodell. Dieses Modell wurde von verschiedenen Wissenschaftlern entwickelt; das wichtigste Modell kommt aber von Jones und Launder (1972), man nennt es auch als *Standard- $k - \varepsilon$ Modell*. Man geht wieder von der Transportgleichung für die turbulente kinetische Energie (2.65) und von der Boussinesqschen Approximation (2.56) aus, aber der wichtigste Unterschied ist, dass auch die exakte Gleichung für die Dissipation abgeleitet wird. Die exakte Transportgleichung für Dissipation ε sieht dann nach der Reynoldsschen Mittelung so aus (vgl. Wilcox 1994: 87f):

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = -2\mu \left[\overline{u'_{l,k} u'_{j,k}} + \overline{u'_{k,l} u'_{k,j}} \right] \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - 2\mu \overline{u'_{k,l} u'_{l,j}} \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_k \partial x_j} - 2\mu \overline{u'_{l,k} u'_{l,m} u'_{k,m}} - 2\mu \overline{v u'_{l,k m} u'_{l,k m}} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} - \mu \overline{u'_j u'_{l,m} u'_{l,m}} - 2\nu \overline{p'_{,m} u'_{j,m}} \right] \quad (2.71)$$

Die einzelnen Glieder auf der rechten Seite entsprechen: Produktionsterm der Dissipation, Dissipationsterm der Dissipation, molekulare Diffusion der Dissipation, und turbulenter Transport der Dissipation. Diese Gleichung ist aber viel mehr kompliziert als die exakte Transportgleichung für k und enthält viele neue Unbekannte und auch zweifache und dreifache Korrelationen (vgl. Wilcox 1994: 88).

Um die Gleichung zu schließen, wurde eine Approximation durch Schließkonstanten vorgeschlagen. Dann wird die vereinfachte Transportgleichung für ε an dem Standard- $k - \varepsilon$ Modell dargestellt (vgl. Wilcox 1994: 89):

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (2.72)$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.73)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} \tau_{ij} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (2.74)$$

$$C_{\varepsilon 1} = 1,44, C_{\varepsilon 2} = 1,92, C_\mu = 0,09, \sigma_k = 1,0, \sigma_\varepsilon = 1,3$$

$$\tau = \frac{k}{\varepsilon} \quad (2.75)$$

$$l = C_\mu \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (2.76)$$

$\overline{v^2} - f$ Modell

Durbin hat in seinem Modell vorgeschlagen, dass sich für die Bestimmung von μ_t die Normalkomponente des Reynolds Spannungstensors $\overline{u'_j u'_j}$ besser eignet als k . Er hat eine Geschwindigkeitsskala $\overline{v^2} = \overline{u'_j u'_j}$, die senkrecht zur Wand wirkt, und eine elliptische Dämpfungsfunktion f hinzugefügt. Dadurch werden bei komplexen dreidimensionalen Strömungen mit sekundärer Zirkulation, Rotation und Strudel bessere Ergebnisse erzielt als bei konventionellem $k - \varepsilon$ Modell (vgl. Hanjalic/Popovac/Hadziabdic 2004: 1047; Hanjalic 2005: 74).

In dem $\overline{v^2} - f$ Modell wird die turbulente Viskosität μ_t definiert als:

$$\mu_t = \rho C_\mu \overline{v^2} \tau \quad (2.77)$$

Ebenso wie das $k - \varepsilon$ Modell beinhaltet das $\overline{v^2} - f$ Modell eine Transportgleichung für die turbulente kinetische Energie:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \mu_t \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.78)$$

und für die Dissipationsrate:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon}{\tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \mu_t \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (2.79)$$

Zusätzlich wird in diesem Vier-Gleichungsturbulenzmodell eine Transportgleichung für die Geschwindigkeitsskala benötigt:

$$\rho \frac{\partial \overline{v^2}}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \overline{v^2}}{\partial x_j} = k f - \frac{\overline{v^2}}{k} \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \mu_t \right) \frac{\partial \overline{v^2}}{\partial x_k} \right] \quad (2.80)$$

Die Poisson-Gleichung für die Funktion f sieht wie folgt aus:

$$l^2 \nabla^2 f - f = \frac{1}{\tau} (C_1 - 1) \left(\frac{\overline{v^2}}{k} - \frac{2}{3} \right) - C_2 \frac{P_k}{\varepsilon} \quad (2.81)$$

Die Randbedingung für f auf der Wand macht das Modell empfindlich auf Gitterauflösung und toleriert nicht zu kleine Werte von y^+ (vgl. Hanjalic/Popovac/Hadziabdic 2004: 1047).

$$f_w = \lim_{y \rightarrow 0} \frac{-20 \overline{v^2}}{\varepsilon y^4} \quad (2.82)$$

Bei der Längenskala und Zeitskala wird die untere Grenze der Kolmogorov Längen- und Zeitskala gesetzt und mit Durbin *realizability constraints* kombiniert (vgl. Hanjalic/Popovac/Hadziabdic 2004: 1047; Hanjalic 2005: 74).

$$\tau = \max \left[\min \left(\frac{k}{\varepsilon}, \frac{a}{\sqrt{6} C_\mu |\bar{s}| \zeta} \right), C_\tau \left(\frac{v}{\varepsilon} \right)^{1/2} \right] \quad (2.83)$$

$$l = C_l \max \left[\min \left(\frac{k^{3/2}}{\varepsilon}, \frac{k^{1/2}}{\sqrt{6} C_\mu |\bar{s}| \zeta} \right), C_\eta \left(\frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \right] \quad (2.84)$$

$$C_{\varepsilon 1} = 1,4 \left(1 + 0,012\sqrt{v^2/k}\right), C_{\varepsilon 2} = 1,9, C_{\mu} = 0,22, C_1 = 1,4, C_2 = 0,45, C_{\tau} = 6,0, C_l = 0,36, C_{\eta} = 85$$

$k - \varepsilon - \zeta - f$ Modell

Ist ein Vier-Gleichungsturbulenzmodell basiert auf der elliptischen Dämpffunktion von Durbin und auf seinem $\overline{v^2} - f$ Modell. Bei dem $k - \varepsilon - \zeta - f$ Modell wird die Geschwindigkeitsskala ζ und die Randbedingung an der Wand der elliptischen Relaxation f wie folgt modifiziert (vgl. Hanjalic/Popovac/Hadziabdic 2004: 1047ff):

$$\zeta = \frac{\overline{v^2}}{k} \quad (2.85)$$

Die Normierung durch k macht das Modell mehr numerisch stabil im Vergleich zum Durbin's $\overline{v^2} - f$ Modell.

$$f_w = \lim_{y \rightarrow 0} \frac{-2\nu\zeta}{y^2} \quad (2.86)$$

Die Änderung des Nenners von y^4 auf y^2 im Vergleich zu dem $\overline{v^2} - f$ Modell macht das $k - \varepsilon - \zeta - f$ Modell weniger empfindlich auf die Feinheit und Uneinheitlichkeit des Gitters an der Wand.

Die Definition für die turbulente Viskosität μ_t wird wie folgt angepasst. Die k - und die ε -Transportgleichung bleiben unverändert.

$$\mu_t = \rho C_{\mu} \zeta k \tau \quad (2.87)$$

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \rho \varepsilon + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (2.88)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = \frac{C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon}{\tau} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\varepsilon}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] \quad (2.89)$$

Nach der gleichen Anordnung wie k - und ε - hat die ζ -Transportgleichung folgende Form:

$$\rho \frac{\partial \zeta}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \zeta}{\partial x_j} = f - \frac{\zeta}{k} P_k + \frac{\partial}{\partial x_k} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\zeta}} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial x_k} \right] + X \quad (2.90)$$

wo X die Kreuzdiffusion ist:

$$X = \frac{2}{k} \left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\zeta}} \right) \frac{\partial \zeta}{\partial x_k} \frac{\partial k}{\partial x_k} \quad (2.91)$$

Die elliptische Dämpffunktion f dämpft die Normalspannung bzw. die Produktion in der ζ -Gleichung in der wandnahen Region. Sie wird wie folgt modifiziert:

$$l^2 \nabla^2 f - f = \frac{1}{\tau} \left(c_1 + C'_2 \frac{P_k}{\varepsilon} \right) \left(\zeta - \frac{2}{3} \right) \quad (2.92)$$

Die Definition der Zeit- und der Längenskala wird inklusive Durbin's *realizability constraints* aus dem $\overline{v^2} - f$ Modell übernommen.

$$\tau = \max \left[\min \left(\frac{k}{\varepsilon}, \frac{a}{\sqrt{6} C_{\mu} |\bar{s}| \zeta} \right), C_{\tau} \left(\frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{1/2} \right] \quad (2.93)$$

$$l = C_l \max \left[\min \left(\frac{k^{3/2}}{\varepsilon}, \frac{k^{1/2}}{\sqrt{6} C_{\mu} |\bar{s}| \zeta} \right), C_{\eta} \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \right] \quad (2.94)$$

$$C_{\varepsilon 1} = 1,4(1 + 0,012\zeta), C_{\varepsilon 2} = 1,9, C_{\mu} = 0,22, c_1 = 0,4, C'_2 = 0,65, C_{\tau} = 6,0, C_l = 0,36, C_{\eta} = 85, \sigma_k = 1,0, \sigma_{\varepsilon} = 1,3, \sigma_{\zeta} = 1,2$$

PANS (Partially-averaged Navier Stokes) Modell

Der Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt auf der PANS Methode. PANS ist ein hybrides RANS/LES Verfahren, ursprünglich von Girimaji und Abdol-Hamid (2005) vorgestellt, das nahtlos zwischen RANS und DNS umschaltet. Die Aufgabe von PANS ist das Auflösen von großen Turbulenzstrukturen bei einem angemessenen Rechenaufwand (vgl. Girimaji/Abdol-Hamid 2005: 1).

Das Verhältnis zwischen dem modellierten und dem aufgelösten Anteil bzw. Stufe der physikalischen Auflösung ist durch zwei Verhältnisse f_k und f_ε quantifiziert. Diese zwei Parameter stellen ein Verhältnis von der nichtaufgelösten zu der totalen turbulenten kinetischen Energie und Dissipation dar. Die Spannung von dem nichtaufgelösten Anteil ist durch die Boussinesqsche Approximation modelliert, die nichtaufgelöste turbulente kinetische Energie und Dissipation werden durch die modellierten Transportgleichungen berechnet (vgl. Girimaji/Abdol-Hamid 2005: 1 und 3).

$$f_k = \frac{k_u}{k_{tot}}; \quad f_\varepsilon = \frac{\varepsilon_u}{\varepsilon_{tot}} \quad (2.95)$$

Bei den von Produktion dominierten Strömungen wie z.B. Grenzschichten ohne Druckgradient, Kanalströmung, usw. funktionieren traditionelle RANS Modelle gut genug und können die Eigenschaften der Hauptströmung mit ausreichender Genauigkeit für technische Anwendungen bestimmen. Im Gegenteil bei Strömungen, die überwiegend instationär mit langer Korrelationsdistanz sind, wo kohärente Strukturen eine wichtige Rolle bei Bestimmung von Physik der Turbulenz spielen, sind die RANS Modelle ungünstig. Die LES Methode kann zum Großteil die Bewegungs- und Trägheitsgrößen von solchen Strömungen bestimmen. Jedoch der große Umfang von Strömungsphysik und treue Darstellung von Strömungsdetails resultiert in zu großen Rechenaufwand. Für industrielle Praxis, wo nur die Großstrukturen von Bedeutung sind, ist LES Methode eine kostenaufwändige Variante (vgl. Girimaji/Abdol-Hamid 2005: 1).

PANS steht mit seinem Rechenaufwand und Genauigkeitsgrad zwischen RANS und LES; nur die wichtigen instationären Großstrukturen werden abgebildet, verbunden mit einem geringen Rechenaufwand. Das optimale Verhältnis zwischen dem aufgelösten und modellieren Anteil wird von Fall zu Fall unterschiedlich, abhängig von Strömungsgeometrie und physikalischen Effekten. Deshalb ist ein nahtloser Übergang von dem aufgelösten zu dem modellierten Anteil wichtig (vgl. Girimaji/Abdol-Hamid 2005: 2).

Die Auflösung bei LES ist in Hinsicht auf die *cut-off* Wellenzahl λ_c quantifiziert. Je größer die *cut-off* Wellenzahl ist, desto mehrere Strukturen werden richtig aufgelöst und die Berechnung genauer. Die *cut-off* Wellenzahl wird durch Filtern und durch Subgrid-Spannung bestimmt. Bei PANS ist wichtig dazu eine Analogie zu finden; einen Parameter, der die Auflösung bestimmt, die Filterung quantifiziert und wodurch die gewünschte Auflösung gewährleistet wird. Dieser f_k Parameter hängt von der Gittergröße und von der Längenskala ab (vgl. Girimaji/Abdol-Hamid 2005: 3):

$$f_k \geq \frac{1}{\sqrt{C_\mu}} \left(\frac{\Delta}{\Lambda}\right)^{2/3}; \quad \Lambda = \frac{k_{tot}^{3/2}}{\varepsilon_u} \quad (2.96)$$

wo Δ die geometrisch gemittelte Zellgröße: $\Delta = (\Delta_x \times \Delta_y \times \Delta_z)^{1/3}$ und Λ ist die Kolmogorov Längenskala sind (Basara et al. 2011: 2629). Nach Physik der Turbulenz beinhalten die Großstrukturen den größten Teil der kinetischen Energie und am meisten tritt die Dissipation in den Kleinstrukturen auf, so dass $0 \leq f_k \leq f_\varepsilon \leq 1$. Je kleiner f_k desto größer ist die Auflösung, $f_k = 1$ entspricht RANS, $f_k = 0$ deutet auf DNS (vgl. Girimaji/Abdol-Hamid 2005: 4). Damit der f_k Parameter vernünftig spezifizieren werden kann, muss die räumliche Verteilung der totalen kinetischen Energie und Dissipation bekannt werden. f_k ist ein dynamischer Parameter, der im Raum und Zeit variiert. Dafür wird die kinetische Energie und Dissipation online gemittelt und das f_k kontinuierlich updatet. Diese Methode ist ähnlich dem dynamischen Smagorinsky Verfahren bei LES (vgl. Girimaji/Abdol-Hamid 2005: 6).

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (2.97)$$

$$k_{tot} = k_{res} + k_{sgs} = k_{res} + k_{k-\varepsilon-\zeta-f} = \frac{1}{2} \bar{u}_i \bar{u}_i + \frac{1}{2} u'_i u'_i \quad (2.98)$$

Die PANS Variante nach Basara et al. (2011) verwendet für den SGS-Teil das $k - \varepsilon - \zeta - f$ Modell von Hanjalic/Popovac/Hadziabdic (2004).

Das Verhältnis f_ε bestimmt das Maß der Überlappung zwischen energy-containing- und Dissipation-Spektrum (vgl. Girimaji/Abdol-Hamid 2005: 5). Die Annahme $f_\varepsilon = 1$, die von Basara et al. (2011) getroffen wurde, geht davon aus, dass die Dissipation überwiegend nur in dem Dissipation-Spektrum stattfindet (vgl. Basara et al. 2011: 2629).

$$f_\varepsilon = 1 \quad (2.99)$$

In der Navier-Stokesschen Gleichung (Impulsgleichung) wird die Geschwindigkeit u_i ähnlich wie bei LES auf die aufgelöste \bar{u}_i und nichtaufgelöste (modellerte) u'_i Geschwindigkeit geteilt. Diese Filterung ist proportional zu der Reynoldsschen Mittelung (vgl. Basara et al. 2011: 2628).

$$u_i = u_{i_{res}} + u_{i_{sgs}} = u_{i_{res}} + u_{i_{k-\varepsilon-\zeta-f}} \approx \bar{u}_i + u'_i \quad (2.100)$$

$$\rho \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} \quad (2.101)$$

Der Spannungstensor τ_{ij} wird durch Boussinesqsche Approximation definiert:

$$\tau_{ij} = -2\mu_u \bar{s}_{ij} + \frac{2}{3}\rho k_u \delta_{ij} \quad (2.102)$$

wo \bar{s}_{ij} der aufgelöste Deformationsgeschwindigkeitstensor ist:

$$\bar{s}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.103)$$

Die totale Produktion der kinetischen Energie berechnet sich als (Basara et al. 2011: 2629):

$$P = \frac{1}{f_k} (P_u - \varepsilon_u) + \frac{\varepsilon_u}{f_\varepsilon} \quad (2.104)$$

Der nichtaufgelöste Anteil wird durch das $k - \varepsilon - \zeta - f$ Modell modelliert.

$$\rho \frac{\partial k_u}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial k_u}{\partial x_j} = P_u - \rho \varepsilon_u + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_u}{\sigma_{k_u}} \frac{\partial k_u}{\partial x_j} \right) \quad (2.105)$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon_u}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \varepsilon_u}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} P_u \frac{k_u}{\varepsilon_u} - C_{\varepsilon 2}^* \rho \frac{\varepsilon_u^2}{k_u} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{\mu_u}{\sigma_{\varepsilon_u}} \frac{\partial \varepsilon_u}{\partial x_j} \right) \quad (2.106)$$

$$\rho \frac{\partial \zeta_u}{\partial t} + \rho \bar{u}_j \frac{\partial \zeta_u}{\partial x_j} = f_u - \frac{\zeta_u}{k_u} P_u + \frac{\zeta_u}{k_u} \varepsilon_u (1 - f_k) + \frac{\partial}{\partial x_k} \left(\frac{\mu_u}{\sigma_{\zeta_u}} \frac{\partial \zeta_u}{\partial x_j} \right) \quad (2.107)$$

$$l_u^2 \nabla^2 f_u - f_u = \frac{1}{\tau_u} \left(c_1 + c_2 \frac{P_u}{\varepsilon_u} \right) \left(\zeta_u - \frac{2}{3} \right) \quad (2.108)$$

Der Hauptunterschied zu dem $k - \varepsilon - \zeta - f$ Modell von Hanjalic/Popovac/Hadziabdic (2004), der für die Wirbelauflösung sorgt, ist, dass die Modellkoeffizienten $C_{\varepsilon 2}^*$ und σ_{k_u} , σ_{ε_u} , σ_{ζ_u} als Variablen definiert und von f_k abhängig werden (vgl. Basara et al. 2011: 2629):

$$C_{\varepsilon 2}^* = C_{\varepsilon 1} + f_k (C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1}), \quad \sigma_{k_u, \varepsilon_u, \zeta_u} = \sigma_{k, \varepsilon, \zeta} \frac{f_k^2}{f_\varepsilon} \quad (2.109)$$

Bei einem niedrigeren f_k nimmt durch den Koeffizient $C_{\varepsilon 2}^*$ der destruktive Term in der Dissipationsgleichung zu, wodurch die Dissipation sinkt und zugleich die Produktion der turbulenten kinetischen Energie, die für die Wirbelauflösung verantwortlich ist, steigt. Bei einem groben Gitter mit großem f_k bleibt die Dissipation groß und das RANS Modus überwiegt.

Zunächst hat Basara et al. (2011) aus der nichtaufgelösten turbulenten Viskosität den Zeitskalaschalter rausgenommen (vgl. Basara et al. 2011: 2628):

$$\mu_u = \rho C_\mu \zeta_u \frac{k_u^2}{\varepsilon_u} \quad (2.110)$$

Aus der nichtaufgelösten Zeitskala und Längenskala werden die Durbin *realizability constraints* entfernt und die Tatsache berücksichtigt, dass $f_\varepsilon = 1$ bzw. $\varepsilon_u = \varepsilon$ ist (vgl. Basara et al. 2011: 2630).

$$\tau_u = \max \left[\frac{k_u}{\varepsilon}, C_\tau \left(\frac{\nu}{\varepsilon} \right)^{1/2} \right] \quad (2.111)$$

$$l_u = C_l \max \left[\frac{k_u^{3/2}}{\varepsilon}, C_\eta \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon} \right)^{1/4} \right] \quad (2.112)$$

$$C_{\varepsilon 1} = 1,4 \left(1 + \frac{0,045}{\sqrt{\zeta_u}} \right), C_{\varepsilon 2} = 1,9, C_{\varepsilon 2}^* = C_{\varepsilon 1} + f_k (C_{\varepsilon 2} - C_{\varepsilon 1}), C_\eta = 85, C_\mu = 0,22, C_\tau = 6,0, C_l = 0,36,$$

$$c_1 = 0,4, c_2 = 0,65, \sigma_{k_u} = \sigma_k \frac{f_k^2}{f_\varepsilon}, \sigma_k = 1,0, \sigma_{\varepsilon_u} = \sigma_\varepsilon \frac{f_k^2}{f_\varepsilon}, \sigma_\varepsilon = 1,3, \sigma_{\zeta_u} = \sigma_\zeta \frac{f_k^2}{f_\varepsilon}, \sigma_\zeta = 1,2$$

2.2.3. Wandbehandlung: Wandfunktionen

Strömungen mit hohen Reynolds-Zahlen können in zwei ungleich große Gebiete aufgeteilt werden. In dem überwiegenden Gebiet kann die Viskosität vernachlässigt werden. Man bezeichnet das Gebiet als reibungslose Außenströmung. Das zweite Gebiet stellt eine dünne Grenzschicht an der Wand dar, wo die Viskosität eine wichtige Rolle spielt. Durch die Viskosität wird die Haftbedingung an der Wand erfüllt. Bei turbulenten Strömungen wird die Grenzschicht noch in zwei Schichten geteilt. Die dünne Schicht unmittelbar an der Wand, wo die Viskosität einen Einfluss hat, wird als viskose Unterschicht bezeichnet. An die restliche Grenzschicht hat die Viskosität keinen Einfluss, der Teil der Schicht entsteht dank turbulenten Schwankungsbewegungen (vgl. Schlichting/Gersten 2005: 27).

An dieser Stelle hat man zwei Möglichkeiten, wie die Grenzschicht berechnet wird. Entweder wird bis zur Wand integriert oder man setzt eine Wandfunktion ein. Bei der Integration bis zur Wand müssen solche Turbulenzmodelle angewendet werden, die die Wandnähe und viskose Effekte berücksichtigen, wobei das numerische Gitter normal zur Wand so angehäuft werden muss, damit sich der erste wandnahe Zellmittelpunkt in der Entfernung $y^+ = 1$ befindet. Üblich ist Einführung einer Dämpfungsfunktion im Hinblick auf den dimensionslosen Wandabstand oder die lokale turbulente Reynolds-Nummer, um die Wirbelviskosität und andere Terme in den Modellgleichungen so zu ändern, um die viskose wandnahe Effekte und die reibungslose Wandblockierung anders zu betrachten. Die Dämpfungsfunktion und die Anforderung an die Gitterfeinheit in der Wandnähe führen zu erheblicher Erhöhung der Rechenzeit. Die Wandfunktion im Gegensatz überbrückt die viskose Unterschicht, was eine Anwendung von größeren Gittern ermöglicht; der erste wandnahe Zellmittelpunkt muss aber außerhalb von dem von der Viskosität dominierten Gebiet liegen. Ungefähr bei $y^+ \geq 30$ was aber bei komplexen Strömungen schwer überall zu gewährleisten ist. Im Fall, dass das Gitter mit seinem $5 \leq y^+ < 30$ in der Übergangsschicht (*buffer layer*) liegt, kann man weder bis zur Wand integrieren noch die Standardwandfunktion anwenden (vgl. Popovac/Hanjalic 2007: 178).

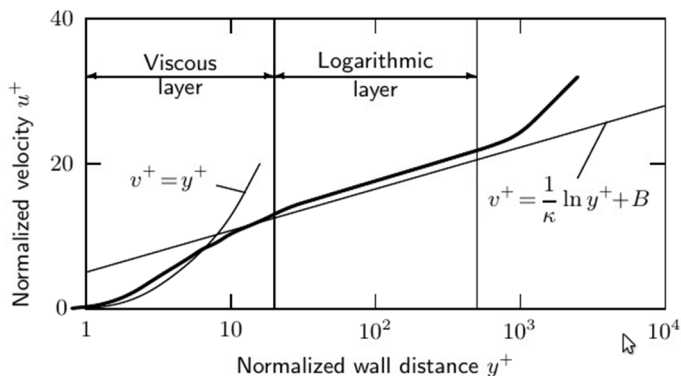


Bild 2.1: Geschwindigkeitsverteilung einer turbulenten Strömung in Wandnähe (Schäfer 2006: 268)

Integration bis zur Wand

Durch die Integration der Gleichungen werden exakte Randbedingungen in der ersten Zelle an der Wand, die entweder in der viskosen Unterschicht oder in dem Übergangsbereich liegt, berechnet.

Für das Verhältnis zwischen der Geschwindigkeit und dem Wandabstand gilt in der viskosen Unterschicht eine lineare Abhängigkeit (vgl. Jakirlic 2013a: 22-27):

Viskose Unterschicht: $\bar{u}^+ = y^+$, logarithmischer Bereich: $\bar{u}^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+)$, bzw.

$$\frac{\bar{u}}{\bar{u}_\tau} = \frac{\bar{u}_\tau y}{\nu} \text{ und } \frac{\bar{u}}{\bar{u}_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{\bar{u}_\tau y}{\nu} + B \quad (2.113)$$

Turbulente Größen weisen in der viskosen Unterschicht ein asymptotisches Verhalten auf:

$$\tau_{tot} = \tau_{visc} + \tau_{turb} = \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \overline{u'v'} \Rightarrow \tau_w = \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (2.114)$$

$$P = -\overline{u'v'} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = \varepsilon \quad (2.115)$$

$$\varepsilon = 2\nu \frac{\partial k^{1/2}}{\partial y} \frac{\partial k^{1/2}}{\partial y} = 2\nu \left(\frac{\partial k^{1/2}}{\partial y} \right)^2 \Rightarrow \varepsilon_w = 0 \quad (2.116)$$

Standardwandfunktion

Bei einer Standardwandfunktion wird die viskose Unterschicht zusammen mit dem Übergangsbereich überbrückt und die unmittelbare Wandnähe wird modelliert. Dabei muss der erste Gitterpunkt an der Wand in dem turbulenten Gebiet liegen, wo eine logarithmische Abhängigkeit zwischen der Geschwindigkeit und dem Wandabstand gilt. Deswegen wird es auch als logarithmischer Bereich (*log law*) genannt (vgl. Jakirlic 2013a: 28).

$$\bar{u}^+ = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \quad (2.117)$$

$$\tau_{turb} = -\rho \overline{u'v'} \text{ nach der Boussinesq-Korrelation} = \mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \Rightarrow \tau_{turb} = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \Rightarrow \tau_{turb} = \rho C_\mu^{1/2} k \text{ bei der Annahme von } constant \text{ stress layer } \tau_{turb} = \tau_w \Rightarrow \rho C_\mu^{1/2} k = \rho \bar{u}_\tau^2 \quad (2.118)$$

$$\bar{u}_\tau = C_\mu^{1/4} k^{1/2}, \quad y^+ = \frac{\rho \bar{u}_\tau y}{\mu} = \frac{\rho C_\mu^{1/4} k^{1/2} y}{\mu} \quad (2.119)$$

$$\tau_w^t = \frac{\rho \kappa C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} \bar{u}_P}{\ln(Ey_P^*)} \psi_P \Rightarrow \frac{\rho \kappa C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} y_P \bar{u}_P}{\ln(Ey_P^*)} \psi_P = \mu_{WF} \frac{\bar{u}_P}{y_P} \psi_P \quad (2.120)$$

was eine Analogie zu der exakten Formulierung in der viskosen Unterschicht ist. Korrelationsfaktor ψ für Strömungen im Gleichgewicht ist $\psi = 1$ (vgl. Popovac/Hanjalic 2007: 185).

Die Dissipation ε beruft sich auf das lokale Gleichgewicht (vgl. Jakirlic 2013a: 30):

$$\rho P = \rho \varepsilon \Rightarrow \rho P_P = \left(\tau_{turb} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)_P = \rho \varepsilon_P \quad (2.121)$$

Berechnet man den Geschwindigkeitsgradient an einem Punkt P und erweitert man die Gleichung um $\frac{\bar{u}}{\bar{u}_\tau} = \frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+)$, bekommt man: $\left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \right)_P = \left[\frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\bar{u}_\tau}{\kappa} \ln(Ey^+) \right) \right]_P = \frac{\bar{u}_\tau}{\kappa y_P}$, daraus ergibt sich dann ε_P wie folgt (vgl. Jakirlic 2013a: 30):

$$\varepsilon_P = \frac{C_\mu^{3/4} k_P^{3/2}}{\kappa y_P} \quad (2.122)$$

Hybride Wandfunktion

Die hybride Wandfunktion (*compound wall treatment*) verbindet die Integration bis zur Wand wenn der erste Knoten P an der Wand in der viskosen Unterschicht (*viscous sublayer*) liegt mit der Standardwandfunktion wenn er in dem voll turbulenten Gebiet ist. Falls sich der Knoten in der Übergangsschicht (*buffer layer*) befindet, werden die Randbedingungen durch eine exponentielle Blendingfunktion zwischen viskosem und voll turbulentem Gebiet geblendet (vgl. Popovac/Hanjalic 2007: 179 und 191).

$$\phi_P = \phi_v e^{-\Gamma} + \phi_t e^{-1/\Gamma} \quad (2.123)$$

Die hybride Wandfunktion wird an folgende Größen angewandt (vgl. Popovac/Hanjalic 2007: 190-195):

- Geschwindigkeitsprofil:

$$\bar{u}^+ = y^+ e^{-\Gamma} + \left[\frac{1}{\kappa} \ln(Ey^+) \right] e^{-1/\Gamma} \quad (2.124)$$

$$\Gamma = \frac{0,01y^+}{1+5y^+} \quad (2.125)$$

Der Blending-koeffizient Γ ist eine Funktion des dimensionslosen Wandabstands:

$$y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu} \quad (2.126)$$

- Wandschubspannung τ_w in Bezug auf die gemittelte Geschwindigkeit,

$$\tau_w = \tau_w^v e^{-\Gamma} + \tau_w^t e^{-1/\Gamma} = \mu \frac{\bar{u}_P}{y_P} e^{-\Gamma} + \frac{\rho \kappa C_\mu^{1/4} k_P^{1/2} \bar{u}_P \psi_P}{\ln(Ey_P^*)} e^{-1/\Gamma} = (\mu e^{-\Gamma} + \mu_{w,P} \psi_P e^{-1/\Gamma}) \frac{\bar{u}_P}{y_P} \quad (2.127)$$

- Produktion P und Dissipation ε der turbulenten kinetischen Energie k ,

$$P_P = -\overline{u'_i u'_i} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = C_\mu^\zeta \zeta_P \frac{k_P^2}{\varepsilon_P} e^{-\Gamma} + \frac{C_\mu^{3/4} k_P^{3/2}}{\psi_P \kappa y_P} \phi_t e^{-1/\Gamma} \quad (2.128)$$

wo $C_\mu^\zeta = 0,22$ und $C_\mu = 0,07$.

$$\varepsilon_P = \frac{2\nu k_P}{y_P^2} e^{-\Gamma_\varepsilon} + \frac{C_\mu^{3/4} k_P^{3/2}}{\kappa y_P} e^{-1/\Gamma_\varepsilon} \quad (2.129)$$

Wegen der steilen und nichtmonotonen Änderung der Dissipation in Wandnähe wurde der Exponent Γ_ε der Blendingfunktion leicht modifiziert (vgl. Popovac/Hanjalic 2007: 193):

$$\Gamma_\varepsilon = \frac{0,001y^+}{1+y^+} \quad (2.130)$$

Bei dem $k - \varepsilon - \zeta - f$ Modell wird auch eine Wandfunktion für f benötigt. Eine Anwendung von der Blendingfunktion ist an dieser Stelle nicht möglich, weil f in viskoser Unterschicht und in dem turbulenten Gebiet unterschiedlich definiert ist (vgl. Popovac/Hanjalic 2007: 194):

$$f^v = \frac{-2\nu\zeta_P}{y_P^2} \quad (2.131)$$

$$f^t = \left(\frac{1+C'_{2P}}{\varepsilon} \right) \left(\frac{\zeta - \frac{2}{3}}{\tau} \right) \quad (2.132)$$

Aus diesem Grund hat man sich für die Anwendung der Formulierung für die viskose Unterschicht für den ganzen Bereich entschieden (vgl. Popovac/Hanjalic 2007: 195).

$$f_w = \frac{-2\nu\zeta_P}{y_P^2} \quad (2.133)$$

Die Definition ist nur für die erste Zelle an der Wand korrekt, weg von der Wand geht $f \rightarrow 0$ was nicht korrekt ist. Weil man die Randbedingungen nur an der Wand setzt, ist diese Annahme akzeptabel, der Wert wird in dem Ferngebiet durch die f -Gleichung korrigiert (vgl. Popovac/Hanjalic 2007: 195).

2.2.4. Numerische Diskretisierung

Die Finite-Volumen-Methode benutzt als Ausgangspunkt eine Integrierung der Erhaltungsgleichung für das Geschwindigkeitsfeld und jede beliebige Strömungsgröße.

Das Problemgebiet wird in eine endliche Anzahl von Kontrollvolumina (KV) in einem Gitter untergeteilt. Seiten der Kontrollvolumina dürfen sich nicht überlappen, jede Seite ist gemeinsam für zwei benachbarte Kontrollvolumina (vgl. Ferziger/Peric 2002: 71; Jakirlic 2017b: 3).

$$\frac{\partial}{\partial t} \iiint_V \rho \phi dV + \iint_S \rho \phi v \cdot \vec{n} dS = \iint_S \Gamma \Delta \phi \cdot \vec{n} dS + \iiint_V q_{\phi,V} dV + \iint_S q_{\phi,S} dS \quad (2.134)$$

zeitliche Änderung von ϕ in V Konvektion von ϕ durch S Diffusion von ϕ durch S Quelle / Senke von ϕ in / durch V/S

Diese Integrale sind sowohl für jedes Kontrollvolumen als auch für das gesamte Problemgebiet gültig. Wenn man Gleichungen aus allen Kontrollvolumina zusammenaddiert, bekommt man eine globale Erhaltungsgleichung, wobei sich die Flächenintegrale der inneren Flächen aufheben.

Damit man für ein bestimmtes KV eine algebraische Gleichung bekommt, müssen die Flächen- und Volumenintegrale mittels quadratische Formeln approximiert werden (vgl. Jakirlic 2017b: 3f).

$$\{A_P^t(\phi_P - \phi_P^t)\} + \{\phi_P \sum_k A_k^e + \sum_k A_k^c \phi_k\} - \{\phi_P \sum_k A_k^d + \sum_k A_k^d \phi_k\} = \{Q_\phi - Q_{\phi_P} \phi_P\} \quad (2.135)$$

Meinst benutztes Verfahren ist, die Kontrollvolumina in einem Gitter zu definieren, wobei der Rechenknoten der KV-Mitte zugeordnet wird. Damit entspricht der Knotenwert dem Mittelwert über das Volumen des KV und eine Genauigkeit zweiter Ordnung wird erreicht (vgl. Ferziger/Peric 2002: 71f).

Eine gesamte Fläche eines KV besteht aus vier (in 2D) bzw. aus sechs (in 3D) geraden Flächen, deren Bezeichnung der Richtung (e - East, w - West, n - North, s - South) in Bezug auf den Zentalknoten P entspricht.

Der gesamte Fluss über die Ränder des KV ist eine Summe aus Integralen über vier bzw. sechs KV-Flächen (vgl. Ferziger/Peric 2002: 72):

$$\iint_S f dS = \sum_k \iint_{S_k} f dS \quad (2.136)$$

wo f die Komponente des konvektiven oder des diffusiven Vektors in einer normalen Richtung zur KV-Fläche ist:

$$f^c = \rho \phi \vec{v} \cdot \vec{n} \quad (2.137)$$

$$f^d = \Gamma(\text{grad}\phi) \cdot \vec{n} \quad (2.138)$$

Im Folgenden wird nur eine beliebig ausgewählte Fläche, in diesem Fall die Fläche e , betrachtet.

Um das Integral (2.136) richtig zu berechnen, muss der Intergrand f überall auf der Fläche S_e bekannt sein. Das ist aber nicht der Fall, weil die Knotenwerte von ϕ nur in KV-Mitte berechnet werden. An dieser Stelle muss eine Approximation eingefügt werden. Am besten eignet sich dazu eine zweistufige Approximation:

- zuerst wird das Integral in Bezug auf verschiedene Werte auf einer oder mehreren Stellen an der Zellenfläche approximiert,
- die Werte an der Zellenfläche werden in Bezug auf den Knotenwert in KV-Mitte approximiert (vgl. Ferziger/Peric 2002: 73).

Das Integral wird nach dem *midpoint rule* als Produkt des Integrand in die Mitte der Zellenfläche (dies ist selbst eine Approximation des Mittelwerts über Fläche) und in das Gebiet der Zellfläche approximiert. Diese Approximation, unter der Voraussetzung, dass der Wert f an der Stelle e bekannt ist, ist zweiter Ordnung

Genauigkeit. Falls der Wert von f in der Flächenmitte e nicht bekannt ist, muss durch eine Interpolation gewonnen werden (vgl. Ferziger/Peric 2002: 74).

$$F_e = \iint_{S_e} f dS = \bar{f}_e S_e \approx f_e S_e \quad (2.139)$$

Quellterme in der Transportgleichung benötigen eine Integration über das Volumen des KV. Eine Approximation der Genauigkeit zweiter Ordnung ist das Volumenintegral durch ein Produkt des Mittelwerts des Integrands und des KV-Volumen zu ersetzen und das Ganze als Wert in KV-Mittelpunkt zu approximieren (vgl. Ferziger/Peric 2002: 75):

$$Q_P = \iiint_V q_\phi dV = \bar{q}_\phi \Delta V \approx (q_\phi)_P \Delta V \quad (2.140)$$

wo $(q_\phi)_P$ ein Wert von q_ϕ in dem KV-Mittelpunkt ist.

Approximation höherer Ordnung benötigt Werte von q_ϕ an mehreren Stellen als nur in der Mitte. Diese Werte müssen durch eine Interpolation von den Knotenwerten gewonnen werden (vgl. Ferziger/Peric 2002: 75).

2.2.4.1. Konvektiver Fluss

Beim Transport einer Skalargröße im bekannten Geschwindigkeitsfeld, im Fall, dass die Normalgeschwindigkeit entlang der Zellenfläche konstant ist, wird der konvektive Fluss als Produkt vom Massenfluss und dem Mittelwert von ϕ ausgedrückt (vgl. Ferziger/Peric 2002: 82ff):

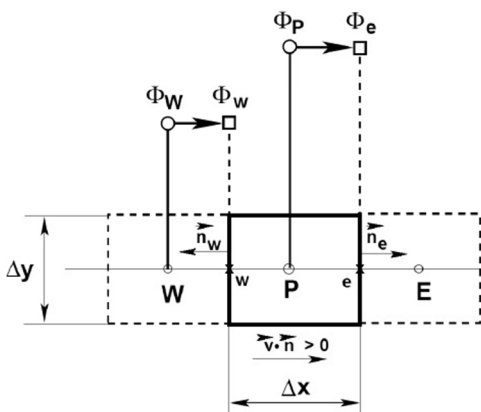
$$F_e^c = \iint_{S_e} \rho \phi \vec{v} \cdot \vec{n} dS \approx \dot{m}_e \phi_e \quad (2.141)$$

wo \dot{m}_e der Massenfluss durch die Fläche e ist:

$$\dot{m}_e = \iint_{S_e} \rho \vec{v} \cdot \vec{n} dS = (\rho u_x)_e S_e = (\rho u_x)_e \Delta y \quad (2.142)$$

Upwind Interpolation (UDS)

Das Approximieren von ϕ_e durch seinen Wert auf einen Knoten stromaufwärts von e ist äquivalent zu Verwendung von einer Vorwärts- bzw. Rückwärts-Differenz Approximation für die erste Ableitung (je nach Stromrichtung). Aus diesem Grund als *upwind differencing scheme* genannt (vgl. Ferziger/Peric 2002: 76).



$$\phi_e = \phi_P + (x_e - x_P) \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_P \quad (2.143)$$

In UDS ist ϕ_e approximiert als (vgl. Jakirlic 2017b: 11):

$$\phi_e = \begin{cases} \phi_P & \text{wenn } (\vec{v} \cdot \vec{n})_e > 0 \\ \phi_E & \text{wenn } (\vec{v} \cdot \vec{n})_e < 0 \end{cases} \quad (2.144)$$

$$F_e^c = \iint_{S_e} \rho \phi \vec{v} \cdot \vec{n} dS \approx \dot{m}_e \phi_e = \begin{cases} \dot{m}_e \phi_P & \text{wenn } (\vec{v} \cdot \vec{n})_e > 0 \\ \dot{m}_e \phi_E & \text{wenn } (\vec{v} \cdot \vec{n})_e < 0 \end{cases} \quad (2.145)$$

In einem Allgemeinfall dann:

$$- \text{stromabwärts: } f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_i)}{\Delta x} \quad (2.146)$$

$$- \text{stromaufwärts: } f'(x_i) = \frac{f(x_i) - f(x_{i-1})}{\Delta x} \quad (2.147)$$

Bild 2.2: Upwind Differencing Scheme (Jakirlic 2017b: 11)

Bei dieser Approximation wird die Beschränktheitsbedingung *boundedness* bedingungslos erfüllt. Jedoch wird es erreicht durch eine numerische Diffusion. Die Approximation gibt nur den ersten Term aus der Taylorreihe wieder, damit ist das Schema erster Ordnung Genauigkeit. Terme höherer Ordnung gehen verloren (vgl. Ferziger/Peric 2002: 76).

Linearinterpolation (CDS)

Andere mögliche Approximation des Wertes in der KV-Flächenmitte ist eine Linearapproximation zwischen zwei benachbarten Knoten. Für den Wert ϕ an der Stelle e gilt (vgl. Ferziger/Peric 2002: 77):

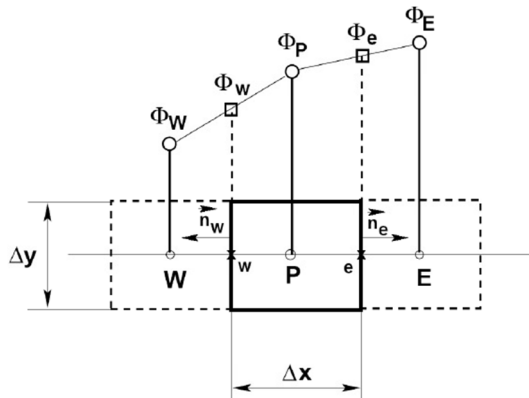


Bild 2.3: Central Differencing Scheme (Jakirlic 2017b: 10)

$$\phi_e = \phi_E \lambda_e + \phi_P (1 - \lambda_e) \quad (2.148)$$

wo λ_e ein Interpolationsfaktor ist:

$$\lambda_e = \frac{x_e - x_P}{x_E - x_P} \quad (2.149)$$

Gleichung (2.148) ist zweiter Ordnung Genauigkeit, kann aber eine oszillierende Lösung liefern. Dieses Schema entspricht der *central-difference* Approximation von der ersten Ableitung. Aus diesem Grund wird also als *central differencing scheme* genannt (vgl. Ferziger/Peric 2002: 77). Bei Annahme eines linearen Profils zwischen Knoten P und E wird der konvektive Fluss durch die KV-Seite e wie folgt definiert (vgl. Jakirlic 2017b: 10):

$$F_e^c = \iint_{S_e} \rho \phi \vec{v} \cdot \vec{n} dS \approx \dot{m}_e \phi_e = \dot{m}_e \lambda_e \phi_E + \dot{m}_e (1 - \lambda_e) \phi_P \quad (2.150)$$

Bei einem allgemeinen Fall gilt: $f'(x_i) = \frac{f(x_{i+1}) - f(x_{i-1}))}{2\Delta x}$ (2.151)

Linearextrapolation (LUDS)

Linear upwind scheme stellt eine Approximation des ϕ_e Werts durch eine Linearextrapolation von zwei Knoten die sich stromaufwärts befinden. Dieses Schema ist ebenso Genauigkeit zweiter Ordnung, ist aber mehr komplex als CDS und kann zu einer unbeschränkten Lösung führen (vgl. Jakirlic 2017b: 13; Ferziger/Peric 2002: 81).

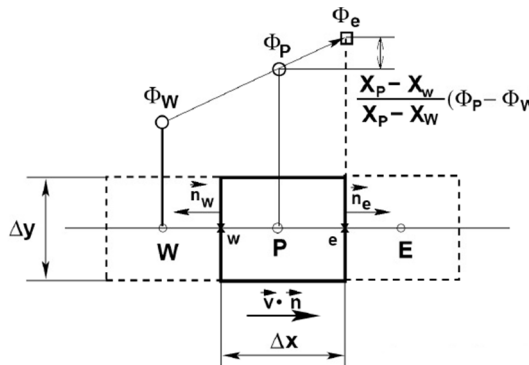


Bild 2.4: Linear Upwind Scheme (Jakirlic 2017b: 13)

$$\phi_e = \phi_P + \frac{x_P - x_W}{x_P - x_W} (\phi_P - \phi_W) \text{ wenn } (\vec{v} \cdot \vec{n})_e > 0 \quad (2.152)$$

Die Integrationskonstante lässt sich umformulieren:

$$\lambda_W = \frac{x_W - x_P}{x_P - x_W} \Rightarrow 1 - \lambda_W = \frac{x_P - x_W}{x_P - x_W} \quad (2.153)$$

$$\phi_e = \phi_P + (1 - \lambda_W) (\phi_P - \phi_W) \text{ wenn } (\vec{v} \cdot \vec{n})_e > 0 \quad (2.154)$$

$$F_e^c = \iint_{S_e} \rho \phi \vec{v} \cdot \vec{n} dS \approx \dot{m}_e \phi_e = \dot{m}_W \phi_P + \dot{m}_W (1 - \lambda_W) (\phi_P - \phi_W) \text{ wenn } (\vec{v} \cdot \vec{n})_e > 0 \quad (2.155)$$

Quadratische Upwind Interpolation

Der Verlauf zwischen Knoten P und Knoten E wird im Vergleich zu CDS durch eine Parabel anstatt durch eine Gerade approximiert. Um die Parabel zu konstruieren wird zusätzlich ein dritter Knoten W stromaufwärts verwendet (unter Voraussetzung dass die Strömung von P nach E fließt) (vgl. Ferziger/Peric 2002: 78).

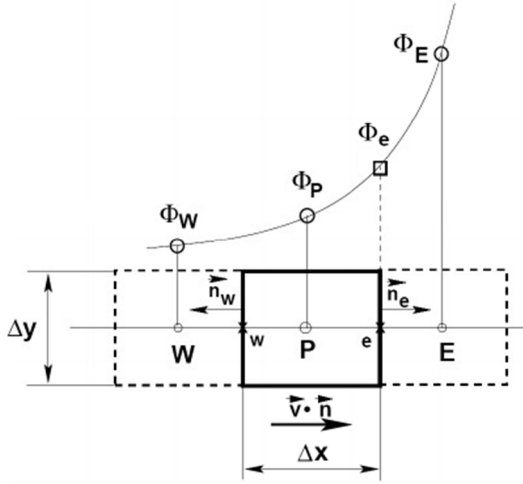


Bild 2.5: Quadratic Upwind Differencing Scheme (Jakirlic 2017b: 13)

$$\phi_e = a_1 \phi_E - a_2 \phi_W + (1 - a_1 + a_2) \phi_P \text{ wenn } (\vec{v} \cdot \vec{n})_e > 0 \quad (2.156)$$

$$\text{wo } a_1 = \frac{(2-\lambda_w)\lambda_e^2}{1+\lambda_e-\lambda_w} \text{ und } a_2 = \frac{(1-\lambda_e)(1-\lambda_w)^2}{1+\lambda_e-\lambda_w}$$

Dieses Schema ist auch unter der Bezeichnung QUICK (*quadratic upwind interpolation for convective kinematics*) bekannt. Obwohl die Abweichung dritter Ordnung Genauigkeit ist, bleibt die Approximation zweiter Ordnung Genauigkeit (vgl. Ferziger/Peric 2002: 78).

$$F_e^c = \iint_{S_e} \rho \phi \vec{v} \cdot \vec{n} dS \approx \dot{m}_e \phi_e = \dot{m}_w a_1 \phi_E - \dot{m}_w a_2 \phi_W + \dot{m}_w (1 - a_1 + a_2) \phi_P \text{ wenn } (\vec{v} \cdot \vec{n})_e > 0 \quad (2.157)$$

TVD (*total variation diminishing*) Schemata

Die Beschränktheitsbedingung wird bei diesen Schemata erfüllt. Sie sagt, dass der Wert ϕ an dem Knoten C (*central*) (folglich an der Zellenseite f (*face*)) zwischen den Werten der grenzenden Knoten U (*upstream*) und D (*downstream*) liegen muss, damit keine lokalen Maxima und Minima entstehen können. Diese Bedingung erfüllt nur UDS (vgl. Jakirlic 2017b: 14).

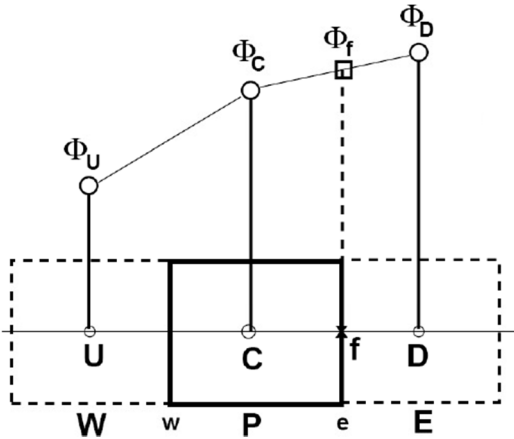


Bild 2.6: Bezeichnung der KV, Knoten, Flächen und deren Werte (Jakirlic 2017b: 15)

$$\phi_U \leq \phi_C \leq \phi_D \text{ bzw. } \phi_U \geq \phi_C \geq \phi_D \quad (2.158)$$

Für folgende Darstellung muss ein dimensionsloser Wert $\tilde{\phi}$ eingeführt werden.

$$\tilde{\phi} = \frac{\phi - \phi_U}{\phi_D - \phi_U} \Rightarrow \tilde{\phi}_C = \frac{\phi_C - \phi_U}{\phi_D - \phi_U} \text{ bzw. } \tilde{\phi}_f = \frac{\phi_f - \phi_U}{\phi_D - \phi_U} \quad (2.159)$$

Dazu wird angenommen: $\tilde{\phi}_D = 1$ und $\tilde{\phi}_U = 0$.

Die Beschränktheitsbedingung wird dann formuliert als:

$$\tilde{\phi}_U \leq \tilde{\phi}_C \leq \tilde{\phi}_D \Rightarrow 0 \leq \tilde{\phi}_C \leq 1 \text{ und } 0 \leq \tilde{\phi}_f \leq 1 \quad (2.160)$$

Für die Diskretisierungsschemata gilt dann (vgl. Jakirlic 2017b: 15):

$$\text{- UDS: } \phi_f = \phi_C \Rightarrow \tilde{\phi}_f = \tilde{\phi}_C \quad (2.161)$$

$$\text{- CDS: } \phi_f = \frac{1}{2} (\phi_D + \phi_C) \Rightarrow \tilde{\phi}_f = \frac{1}{2} (\tilde{\phi}_C + 1) \quad (2.162)$$

$$\text{- LUDS: } \phi_f = \frac{3}{2} \phi_C - \frac{1}{2} \phi_U \Rightarrow \tilde{\phi}_f = \frac{3}{2} \tilde{\phi}_C \quad (2.163)$$

$$\text{- QUUDS: } \phi_f = \frac{3}{4} \phi_C + \frac{3}{8} \phi_D - \frac{1}{8} \phi_U \Rightarrow \tilde{\phi}_f = \frac{3}{4} \tilde{\phi}_C + \frac{3}{8} \quad (2.164)$$

Die Beschränktheitsbedingung ist oberhalb durch $\tilde{\phi}_f = \tilde{\phi}_C$ und unterhalb durch $\tilde{\phi}_f = 1$ abgegrenzt. Im Fall, dass der Wert $\tilde{\phi}$ im Knoten C entweder $\tilde{\phi}_C < 0$ oder $\tilde{\phi}_C > 1$ ist, wird der Wert $\tilde{\phi}_f$ als $\tilde{\phi}_f = \tilde{\phi}_C$ approximiert, das UDS Schema wird verwendet (vgl. Jakirlic 2017b: 16).

MINMOD Schemata

MINMOD Schemata stellen eine Kombination von UDS, CDS und LUDS Schemata dar, je nach im welchen Bereich sich der Wert von $\tilde{\phi}_C$ befindet (vgl. Jakirlic 2017b: 16):

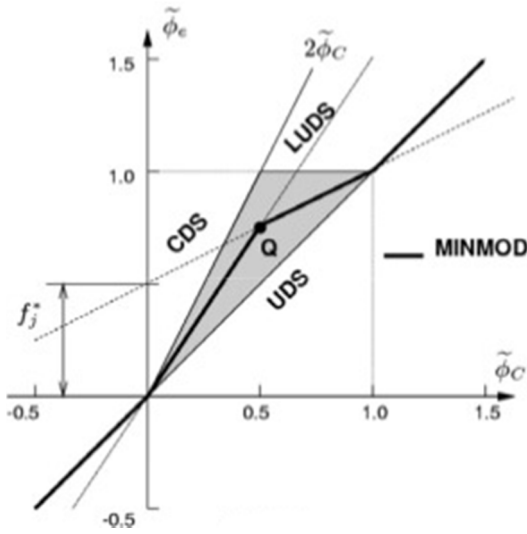


Bild 2.7: NVD Diagramm MINMOD Schemata (AVL 2011: 2-55)

$$\phi_f = \tilde{\phi}_f(\phi_D - \phi_U) + \phi_U \quad (2.165)$$

$$\tilde{\phi}_f^{MINMOD} = \begin{cases} \tilde{\phi}_C & \text{wenn } \tilde{\phi}_C < 0 \quad (UDS) \\ \frac{3}{2}\tilde{\phi}_C & \text{wenn } 0 \leq \tilde{\phi}_C < \frac{1}{2} \quad (LUDS) \\ \frac{1}{2}(\tilde{\phi}_C + 1) & \text{wenn } \frac{1}{2} \leq \tilde{\phi}_C < 1 \quad (CDS) \\ \tilde{\phi}_C & \text{wenn } \tilde{\phi}_C \geq 1 \quad (UDS) \end{cases} \quad (2.166)$$

Für eine graphische Darstellung der Abhängigkeit von ϕ_f auf ϕ_C wird sogenanntes *normalized variable* Diagramm (NVD) benutzt.

SMART (sharp and monotonic algorithm for realistic transport) Schemata vs. AVL SMART Schemata

Die SMART Schemata sind definiert als (vgl. Jakirlic 2017b: 17):

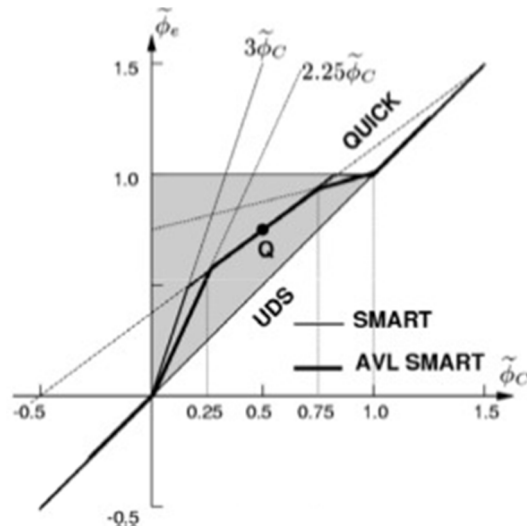


Bild 2.8: NVD Diagramm SMART und AVL SMART Schemata (AVL 2011: 2-55)

$$\phi_f = \tilde{\phi}_f(\phi_D - \phi_U) + \phi_U \quad (2.167)$$

$$\tilde{\phi}_f^{SMART} = \begin{cases} \tilde{\phi}_C & \text{wenn } \tilde{\phi}_C < 0 \quad (UDS) \\ 3\tilde{\phi}_C & \text{wenn } 0 \leq \tilde{\phi}_C < \frac{1}{6} \\ \frac{1}{2}(\tilde{\phi}_C + 1) & \text{wenn } \frac{1}{6} \leq \tilde{\phi}_C < \frac{5}{6} \quad (QUUDS) \\ 1 & \text{wenn } \frac{5}{6} < \tilde{\phi}_C < 1 \\ \tilde{\phi}_C & \text{wenn } \tilde{\phi}_C \geq 1 \quad (UDS) \end{cases} \quad (2.168)$$

Die AVL SMART Schemata unterscheiden sich wie folgt (vgl. AVL 2011: 2-55):

$$\tilde{\phi}_f^{AVL SMART} = \begin{cases} \tilde{\phi}_C & \text{wenn } \tilde{\phi}_C < 0 \quad (UDS) \\ \frac{9}{4}\tilde{\phi}_C & \text{wenn } 0 \leq \tilde{\phi}_C < \frac{1}{4} \\ \frac{1}{2}(\tilde{\phi}_C + 1) & \text{wenn } \frac{1}{4} \leq \tilde{\phi}_C < \frac{3}{4} \quad (QUUDS) \\ \frac{1}{4}(\tilde{\phi}_C + 3) & \text{wenn } \frac{3}{4} < \tilde{\phi}_C < 1 \\ \tilde{\phi}_C & \text{wenn } \tilde{\phi}_C \geq 1 \quad (UDS) \end{cases} \quad (2.169)$$

Die AVL SMART Schemata haben im Vergleich zu den SMART Schemata eine schlechtere Genauigkeit, bringen aber eine bessere Konvergenz (vgl. AVL 2011: 2-56).

2.2.4.2. Diffusiver Fluss

Das Integral des diffusiven Flusses wird durch die *midpoint rule* und durch die Linearinterpolation (CDS) der normalen Ableitung approximiert. Im Fall eines linearen Profils zwischen P und E wird der Gradient wie folgt definiert (vgl. Ferziger/Peric 2002: 77 und 84):

$$\left(\frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_e \approx \frac{\phi_E - \phi_P}{x_E - x_P} \quad (2.170)$$

$$F_e^d = \iint_{S_e} \Gamma \text{grad}\phi \cdot \vec{n} \, dS \approx \left(\Gamma \frac{\partial\phi}{\partial x}\right)_e \Delta y = \frac{\Gamma \Delta y}{x_E - x_P} (\phi_E - \phi_P) \quad (2.171)$$

wo $x_E = \frac{1}{2} (x_{i+1} - x_i)$ und $x_P = \frac{1}{2} (x_i - x_{i-1})$.

2.2.5. Gradienten-Approximation

Gradienten sind nicht nur für die Bestimmung der Skalarwerte an den Zellenflächen nötig, sondern auch für die Berechnung des Diffusionsterms und der Geschwindigkeitsableitung. Der Gradient $\nabla\phi$ des Wertes ϕ ist zur Diskretisierung des konvektiven und diffusiven Terms in der Erhaltungsgleichung benutzt. Die Gradienten werden durch folgende Verfahren berechnet (vgl. AVL 2011: 2-56):

Green-Gauß Theorem

$$\nabla\phi = \frac{1}{V} \iint_S \phi \, dS \Rightarrow \nabla\phi_E = \frac{1}{V_E} \sum_k \phi_k A_k \quad (2.172)$$

dabei wird der Zellenwert durch eine Linearinterpolation (CDS) berechnet (vgl. AVL 2011: 2-56).

Methode der kleinsten Quadrate (*linear least squares*)

Diese Methode nimmt an, dass die Lösung linear variiert (vgl. AVL 2011: 2-56).

$$\frac{\partial\phi}{\partial|d|} = \frac{\nabla\phi d}{\partial|d|}, \text{ wo } d \text{ ein Richtungsvektor ist } \Rightarrow \phi(x) \approx \phi_E + \nabla\phi_E \cdot (x - x_E) \quad (2.173)$$

Die Komponenten von $\nabla\phi_E$ werden durch die Methode der kleinsten Quadrate berechnet (vgl. AVL 2011: 2-57):

$$\frac{\partial}{\partial(\partial\phi/\partial x)} \sum_k (\phi_P - \phi_E - \nabla\phi_E \cdot d_k)^2 = 0; 1 = 1; 2; 3; d_k = x_P - x_E \quad (2.174)$$

$$\nabla\phi_k = \nabla\tilde{\phi}_k + \frac{A_k}{A_k d_k} [(\phi_P - \phi_E) - \nabla\tilde{\phi}_k d_k] \quad (2.175)$$

wo der Gradient an der Zellenfläche entweder durch die Linearinterpolation, oder durch einen arithmetischen Mittelwert berechnet wird (vgl. AVL 2011: 2-57):

$$\nabla\tilde{\phi}_k = \nabla\phi_E \lambda_k + \nabla\phi_P (1 - \lambda_k) \quad (2.176)$$

$$\nabla\tilde{\phi}_k = \frac{1}{2} (\nabla\phi_E + \nabla\phi_P) \quad (2.177)$$

2.2.6. Zeitliche Diskretisierung

Die Zeit wird bei der Finite-Volumen-Methode als „zeitliche Volumina“ betrachtet. Die daraus resultierte Kraft hat keine Rückwirkung, beeinflusst nur die Zukunft (vgl. Jakirlic 2017b: 21f).

$$\iiint_V \rho \frac{\partial\phi_P}{\partial t} \, dV = \rho \frac{\partial\phi_P}{\partial t} \iiint_V \, dV = \rho \delta V \frac{\partial\phi_P}{\partial t} \quad (2.178)$$

$$\frac{\partial\phi_P}{\partial t} = \frac{1}{\rho \delta V} \left[-A_P(t) \phi_P + \sum_k A_k(t) \phi_k + Q_P^\phi(t) \right] \quad (2.179)$$

wo ρ , δV zeitlich konstant sind.

Das Zeitintervall $[t_0; T]$ wird in kleine aufeinander folgende Schritte zerteilt (vgl. Jakirlic 2017b: 22):

$$t_{n+1} = t_n + \Delta t_n, n = 0,1,2, \dots \quad (2.180)$$

Die Lösung zur Zeit t_{n+1} hängt von vorherigen Zeitpunkten ab. Um die Zeitableitung zu diskretisieren, muss mindestens eine alte Zeitebene bekannt werden. Je nach am welchen Zeitpunkt die Gleichung für $\partial\phi_P/\partial t$ berechnet wird, unterscheidet man zwischen folgenden Methoden (vgl. Jakirlic 2017b: 23f):

- explizites Verfahren: $\phi_P^{n+1} = f(\phi_k^n, \phi_k^{n-1}, \dots)$ Diskretisierung nur zu den alten Zeitpunkten,
- implizites Verfahren: $\phi_P^{n+1} = f(\phi_k^{n+1}, \phi_k^n, \phi_k^{n-1}, \dots)$ Diskretisierung auch zu dem neuen noch nicht bekannten Zeitpunkt (vgl. Jakirlic 2017b: 24).

Je nachdem wie viel Zeitebenen bei der Berechnung berücksichtigt werden, unterscheidet man zwischen (vgl. Jakirlic 2017b: 23):

- Einschrittverfahren: $\phi(t_{n+1}) \Leftarrow \{\phi(t_{n+1}), \phi(t_n)\}$ (2.181)

Im AVL Fire: $\left(\frac{\partial\phi_P}{\partial t}\right)_{n+1} = \frac{\phi_P^{n+1} - \phi_P^n}{\Delta t}$ erste Ordnung Genauigkeit, Euler, Zweischrittverfahren (vgl. AVL 2011: 2-58).

- Mehrschrittverfahren: $\phi(t_{n+1}) \Leftarrow \{\phi(t_{n+1}), \phi(t_n), \phi(t_{n-1}), \dots\}$ (2.182)

Im AVL Fire: $\left(\frac{\partial\phi_P}{\partial t}\right)_{n+1} = \frac{3\phi_P^{n+1} - 4\phi_P^n + \phi_P^{n-1}}{2\Delta t_{n+1}}$, $\Delta t_{n+1} = t_{n+1} - t_n = t_n - t_{n-1}$ zweite Ordnung Genauigkeit, Dreischrittverfahren (quadratische Variation über drei Zeitebene) (vgl. AVL 2011: 2-58).

2.2.7. Druckgeschwindigkeitskopplung

Die Navier-Stokes-Gleichungen stellen ein System von nichtlinearen, gekoppelten, partiellen Differenzgleichungen dar. Deswegen wird auf ein iteratives Verfahren zugegriffen. Es gibt keine druckdominierte Gleichung. Das Druckfeld wird aus der Kontinuitätsgleichung bestimmt und in die Impulsgleichungen eingesetzt, wo er in Form eines Gradienten aufritt (vgl. Ferziger/Peric 2002: 167).

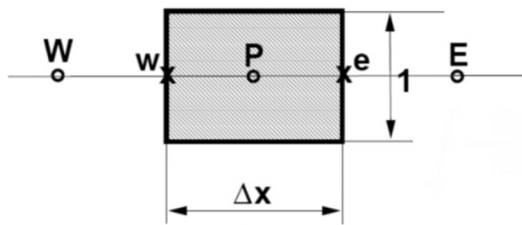


Bild 2.9: Bezeichnung der KV-Knoten und Flächen bei Druck-Geschwindigkeitskopplung (Jakirlic 2017b: 26)

Es sind zwei unterschiedliche Anordnungen möglich. Bei einem werden unterschiedliche Kontrollvolumina benutzt. Kontrollvolumen für die Impulsgleichungen werden versetzt zu dem KV für die Kontinuitätsgleichung (*staggered control volumes*). Zellenflächen e und w für u_x und n und s für u_y liegen mittig zwischen den Knoten. Bei der anderen Anordnung werden alle Variablen nur in einem Kontrollvolumen definiert (*collocated variables*) (vgl. Ferziger/Peric 2002: 165f und 188). Im Programm AVL Fire werden komplexe Geometrien mit nichtorthogonalen Gittern berechnet, deswegen wird auf die *collocated* Variablenanordnung zurückgegriffen.

SIMPLE (*Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations*)

Folgende Iterationsschritte, die die Lineargleichungen und die Druckkorrelation lösen, werden als innere Iterationen genannt, um sie von den äußeren Iterationen zu unterscheiden. Bei einer äußeren Iteration (Iterationsindex **) werden alle nichtlinearen Terme durch das Ergebnis aus der „alten“ vorherigen äußeren Iteration und durch den neuen Wert approximiert (vgl. Ferziger/Peric 2002: 189).

- Zuerst werden die diskretisierten Impulsgleichungen durch die „alten“ Massenflüsse und Druck aus der vorherigen äußeren Iteration gelöst. Damit werden neue Geschwindigkeitsfelder U^* , V^* und die Massenflüsse \dot{m}^* abgeschätzt, die aber die Kontinuitätsgleichung nicht erfüllen (Prediktor-Schritt).

$$U_P^* = H_P(U_k^*) + d_P^U(p_e^* - p_w^*) + S_P^U \quad (2.183)$$

$$V_P^* = H_P(V_k^*) + d_P^V(p_n^* - p_s^*) + S_P^V \quad (2.184)$$

wo als * die abgeschätzten Werte, H die advektiven und viskosen Terme und S die Quellterme ohne Druckgradienten bezeichnet sind.

Zur Überprüfung der Kontinuitätsgleichung sind die Massenflüsse und Geschwindigkeiten an KV-Seiten erforderlich. Um sie zu bekommen, werden die ganzen Terme interpoliert (vgl. Jakirlic 2017b: 34):

$$U_e^* = \overline{H_e(U_k^*)} + \overline{d_e^U}(p_E^* - p_P^*) + \overline{S_e^U} \quad (2.185)$$

$$V_n^* = \overline{H_n(V_k^*)} + \overline{d_n^V}(p_N^* - p_P^*) + \overline{S_n^V} \quad (2.186)$$

wo

$$\overline{H_e(U_k^*)} = H_P(U_k^*)(1 - f_{1P}) + H_E(U_k^*)f_{1P} \quad (2.187)$$

$$\overline{H_n(V_k^*)} = H_P(V_k^*)(1 - f_{2P}) + H_N(V_k^*)f_{2P} \quad (2.188)$$

$$\overline{d_e^U} = d_P^U(1 - f_{1P}) + d_N^U f_{1P} \quad (2.189)$$

$$\overline{d_n^V} = d_P^V(1 - f_{2P}) + d_N^V f_{2P} \quad (2.190)$$

es handelt sich um eine lineare Interpolation zwischen zwei benachbarten Knoten mit Interpolationsfaktoren:

$$f_{1P} = \frac{x_e - x_P}{x_E - x_P} \text{ und } f_{2P} = \frac{y_n - y_P}{y_N - y_P}$$

Diese abgeschätzten Geschwindigkeiten werden in die Kontinuitätsgleichung eingesetzt (vgl. Jakirlic 2017b: 35):

$$\dot{m}_e^* + \dot{m}_w^* + \dot{m}_n^* + \dot{m}_s^* = \Delta \dot{m}_p^* \quad (2.191)$$

$$\dot{m}_e^* = (\rho U^*)_e \Delta y; \dot{m}_w^* = -(\rho U^*)_w \Delta y; \dot{m}_n^* = (\rho V^*)_n \Delta x; \dot{m}_s^* = -(\rho V^*)_s \Delta x \quad (2.192)$$

wo $\Delta \dot{m}_p^*$ eine Abweichung von der Massenbilanz ist.

Weil die abgeschätzten Geschwindigkeiten \vec{U}^* , \vec{V}^* die Kontinuitätsgleichung nicht erfüllen, müssen die Geschwindigkeiten bzw. Massenflüsse korrigiert werden (vgl. Jakirlic 2017b: 35):

$$\text{neue korrigierten Werte} \left\{ \begin{array}{l} \dot{m}^{**} = \dot{m}^* + \dot{m}' \\ U^{**} = U^* + U' \\ V^{**} = V^* + V' \\ p^{**} = p^* + p' \end{array} \right\} \text{Korrektur} \quad (2.193)$$

- In dem Korrektor-Schritt wird mittels Massenerhaltung aus der Korrektur der Massenflüsse bzw. Geschwindigkeiten an den KV-Seiten eine Druckkorrekturgleichung für die Druckkorrektur p' bestimmt (vgl. Jakirlic 2017b: 36; Ferziger/Peric 2002: 194):

$$\dot{m}'_e + \dot{m}'_w + \dot{m}'_n + \dot{m}'_s + \Delta \dot{m}_p^* = 0 \quad (2.194)$$

$$\rho U'_e \Delta y - \rho U'_w \Delta y + \rho V'_n \Delta x - \rho V'_s \Delta x + \Delta \dot{m}_p^* = 0 \quad (2.195)$$

$$A_P p'_P = \sum_k A_k p'_k + \Delta \dot{m}_p^* + \Delta \dot{m}'_p \quad (2.196)$$

dabei ist:

$$A_E = \rho \Delta y \overline{d_e^U}; A_W = \rho \Delta y \overline{d_w^U}; A_N = \rho \Delta x \overline{d_n^V}; A_S = \rho \Delta x \overline{d_s^V}$$

$$A_P = \sum_k A_k \quad (k = E, W, N, S); \Delta \dot{m}_p^* = \dot{m}_e^* + \dot{m}_w^* + \dot{m}_n^* + \dot{m}_s^*$$

Weil die Geschwindigkeitskorrekturen U' V' vor dem Lösen der Druckkorrekturgleichung nicht bekannt sind, wird der Term $\Delta \dot{m}'_p$ bei einem SIMPLE Verfahren vernachlässigt (vgl. Ferziger/Peric 2002: 195).

- Anschließend werden die korrigierten Geschwindigkeiten U^{**} V^{**} und die Massenflüsse \dot{m}^{**} aus den Impulsgleichungen, wo nur das Druckfeld korrigiert ist, berechnet (vgl. Jakirlic 2017b: 35):

$$U_P^{**} = H_P(U_k^*) + d_P^U(p_E^{**} - p_P^{**}) + S_P^U \quad (2.197)$$

$$V_P^{**} = H_P(V_k^*) + d_P^V(p_N^{**} - p_P^{**}) + S_P^V \quad (2.198)$$

$$U_e^{**} = \overline{H_e(U_k^*)} + \overline{d_e^U}(p_E^{**} - p_P^{**}) + \overline{S_e^U} \quad (2.199)$$

$$V_n^{**} = \overline{H_n(V_k^*)} + \overline{d_n^V}(p_N^{**} - p_P^{**}) + \overline{S_n^V} \quad (2.200)$$

Aus den Gleichungen (2.183), (2.184), (2.197), (2.198) und (2.185), (2.186), (2.199), (2.200) entsteht eine Beziehung zwischen den korrigierten Geschwindigkeiten und dem korrigierten Druck, die für den oben beschriebenen Korrektor-Schritt schlüssig ist (vgl. Jakirlic 2017b: 36):

$$U'_P = d_P^U(p'_e - p'_w) \quad (2.201)$$

$$V'_P = d_P^V(p'_n - p'_s) \quad (2.202)$$

$$U'_e = \overline{d_e^U}(p'_E - p'_P) \quad (2.203)$$

$$V'_n = \overline{d_n^V}(p'_N - p'_P) \quad (2.204)$$

Nachdem die Druckkorrekturgleichung gelöst wird, werden die Geschwindigkeiten und der Druck korrigiert. Dabei werden die Impulsgleichungen unterrelaxiert, sodass nur ein Teil der Druckkorrektur der neuen Iteration zu der alten Iteration addiert wird.

Weil der Druck p' aus den approximierten Impulsgleichungen gewonnen wurde, erfüllen sowohl der Druck als auch die Geschwindigkeiten die exakten Impulsgleichungen nicht, also muss eine neue äußere Iteration angefangen werden. Wenn sowohl die Kontinuitätsgleichung als auch die Impulsgleichungen zu einer gewünschten Toleranz erfüllt werden, kann eine neue äußere Iteration beginnen. Am Iterationsanfang zu einem neuen Zeitschritt stellt die Lösung aus der vorherigen Zeitschritt eine erste Schätzung dar (vgl. Ferziger/Peric 2002: 195).

PISO (*Pressure Implicit with Split Operator*)

Bei dem PISO Algorithmus wird noch eine zweite Druckkorrektur durchgeführt. In der zweiten Druckkorrekturgleichung wird der Quellterm $-\Delta \dot{m}'_p$ eingesetzt. Dieser Term war in der ersten Druckkorrekturgleichung vernachlässigt, jetzt kann er aber durch die erste Geschwindigkeitskorrektur berechnet werden (vgl. Ferziger/Peric 2002: 195).

2.2.8. Unterrelaxation

Die Navier-Stokes-Gleichungen sind ein gekoppeltes Gleichungssystem, das heißt die dominierende Variable für bestimmte Gleichung tritt in einigen anderen Gleichungen auf. Um das zu lösen sind zwei Verfahren möglich. Bei einer simultanen Lösung werden alle Variablen gleichzeitig gelöst. Weil dieses Verfahren sehr aufwändig ist, wird häufiger eine sequentielle Lösung verwendet. Dabei wird jede Gleichung für ihre dominierende Variable gelöst, wobei die anderen Variablen als bekannt betrachtet werden; dafür werden die zu derzeit verfügbaren Werte benutzt. Die Gleichungen werden dann in Schritten nacheinander gelöst und der Zyklus wiederholt sich bis alle Gleichungen erfüllt werden (vgl. Ferziger/Peric 2002: 116f).

Iterationsschritte die an jeder Gleichung durchgeführt werden, werden als innere Iterationen bezeichnet. Um eine Lösung zu bekommen, die alle Gleichungen erfüllt, müssen die Koeffizientenmatrizen und der Quellvektor nach jedem Zyklus aktualisiert werden und dann wird der Prozess wiederholt. Diese Zyklen nennt man als äußere Iterationen (vgl. Ferziger/Peric 2002: 117).

Dabei ist notwendig ein Limit zu setzen, wie sich eine bestimmte Variable von einer äußeren Iteration zu einer neuen ändern kann (Unterrelaxation), weil eine Änderung von einer Variable ändert Koeffizienten in anderen Gleichungen, was die Konvergenz verlangsamen oder verhindern könnte (vgl. Ferziger/Peric 2002: 117f).

Eine algebraische Gleichung von einer beliebigen Variable ϕ an dem Knoten P bei einer m -ten äußeren Iteration ist definiert als (vgl. Jakirlic 2017b: 45; Ferziger/Peric 2002: 118):

$$A_P \phi_P = \sum_k A_k \phi_k + Q_P \Rightarrow \phi_P = \frac{\sum_k A_k \phi_k + Q_P}{A_P} \quad (2.205)$$

Dieses Gleichungssystem wird für die ganze Rechendomain iterativ als innere Iterationen gelöst. Wenn sich ϕ bei den ersten äußeren Iterationen ändern würde, wie es in der Gleichung (2.205) definiert ist, würde das eine Instabilität verursachen, also wird dem ϕ^m nur ein Bruchteil der Änderung erlaubt (vgl. Jakirlic 2017b: 45; Ferziger/Peric 2002: 118):

$$\phi_P^m = \phi_P^{m-1} + (\phi_P^m - \phi_P^{m-1}) \alpha_\phi \quad (2.206)$$

wo m die aktuelle und $m - 1$ die vorherige äußere Iteration ist und α_ϕ ($0 < \alpha_\phi \leq 1$) dann den Unterrelaxationsfaktor darstellt.

Die unterrelaxierte algebraische Gleichung an dem Knoten P sieht dann so aus (vgl. Jakirlic 2017b: 46):

$$\frac{A_P}{\alpha_\phi} \phi_P^m = \sum_k A_k \phi_k + \left(Q_P + \frac{1-\alpha_\phi}{\alpha_\phi} \right) A_P \phi_P^{m-1} \quad (2.207)$$

$$A_P^* \phi_P^m = \sum_k A_k \phi_k + Q_P^* \quad (2.208)$$

wo $A_P^* = A_P/\alpha_\phi$ der modifizierte Zentralkoeffizient und Q_P^* der modifizierte Quellterm sind. Diese modifizierte Gleichung wird innerhalb von den inneren Iterationen gelöst. Wenn die äußeren Iterationen konvergieren, ähnelt $\phi_P^m \rightarrow \phi_P^{m-1}$ und der Term, der α_ϕ beinhaltet, verschwindet, so beeinflusst die Unterrelaxation die Endlösung nicht (vgl. Jakirlic 2017b: 46; Ferziger/Peric 2002: 118).

2.2.9. Iteratives Lösungsverfahren

Jedes Lineargleichungssystem kann z.B. durch die Gaußsche Elimination gelöst werden. Die Lösung ist aber sehr aufwändig und die Genauigkeit ist deutlich höher als die Genauigkeit der Diskretisierungsschemata. Eine Lösung mit etwas mehr Genauigkeit als bei den Diskretisierungsschemata ist ausreichend. Dafür eignen sich gut die iterativen Methoden. Bei einer Iterationsmethode wird die Lösung zuerst geschätzt und dann durch Gleichungen systematisch verbessert. Ist jede Iteration unaufwändig und die Iterationsanzahl klein, wird eine iterative Lösung günstiger als eine Direktlösung (vgl. Ferziger/Peric 2002: 97).

Angenommen eine algebraische Gleichung $A\phi = Q$ für ein KV oder einen Knoten ist gegeben. Nach n Iterationen bekommt man eine approximierte Lösung ϕ^n , die die Gleichungen nicht exakt erfüllt. Stattdessen tritt ein Residuum ρ^n auf (vgl. Ferziger/Peric 2002: 97):

$$A\phi^n = Q - \rho^n \quad (2.209)$$

Beim Subtrahieren von den beiden Gleichungen entsteht eine Beziehung für den Iterationsfehler:

$$\epsilon^n = \phi - \phi^n \quad (2.210)$$

wo ϕ eine konvergierte Lösung und ρ^n das Residuum sind:

$$A\epsilon^n = \rho^n \quad (2.211)$$

Ziel eines iterativen Prozesses ist das Residuum und den Iterationsfehler zu Null zu führen (vgl. Ferziger/Peric 2002: 97).

Conjugate Gradient und BiCGSTAB (*biconjugate gradients stabilized*) Methoden

Die Grundidee von den Gradient-Methoden ist eine Lösung für ein Minimierungsproblem, welches dem ursprünglichen Gleichungssystem äquivalent ist. Die conjugate Gradient Methode eignet sich nur für ein symmetrisches System. Wenn die Matrizen symmetrisch und ihre Eigenwerte positiv sind, bzw. es handelt sich um positiv definite Matrizen, die das Gleichungssystem $A\phi = Q$ lösen, ist ihre Lösung äquivalent zu der Suche eines Minimums von (vgl. Ferziger/Peric 2002: 107f):

$$F = \frac{1}{2} \phi^T A \phi - \phi^T Q = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n A_{ij} \phi_i \phi_j - \sum_{i=1}^n \phi_i Q_i \quad (2.212)$$

Dabei wird das Minimum gesucht. Angenommen F ist als eine Fläche in einem Raum gedacht und die Anfangsschätzung ist als ein Punkt in diesem Raum definiert. An diesem Punkt wird der steilste Weg nach unten durch die Fläche gefunden. Die Richtung ist gegenüber des Gradienten der Funktion. Danach wird nach dem tiefsten Punkt an der Linie gesucht. Das Ergebnis hat einen kleineren Wert von F als der Anfangspunkt; damit ist die neue Abschätzung der Lösung näher. Der neue Wert ist dann als Anfangspunkt für die neue Iteration benutzt und der Prozess setzt sich bis zur Konvergenz fort. Eine Verbesserung der Methode stellt die Suche in unterschiedlichen Richtungen gleichzeitig nach Werten α_1 und α_2 dar (vgl. Ferziger/Peric 2002: 108):

$$\phi = \phi^0 + \alpha_1 p^1 + \alpha_2 p^2 \quad (2.213)$$

Das Problem kann auf eine Minimierung von den p^1 und p^2 Vektoren reduziert werden, unter der Voraussetzung, dass die unterschiedlichen Richtungen miteinander verbunden (*conjugate*) sind (vgl. Ferziger/Peric 2002: 108f):

$$p^1 \cdot Ap^2 = 0 \quad (2.214)$$

Diese Eigenschaft kann auf beliebige Anzahl von Richtungen erweitert werden. In der *conjugate* Gradient Methode muss jede neue Suchrichtung mit den vorherigen verbunden sein. Um die Konvergenz zu verbessern, wird die Methode als ein iteratives Verfahren eingesetzt, wo ρ^k ist das Residuum der k-ten Iteration, p^k ist die k-te Suchrichtung, z^k ist ein Hilfsvektor, α^k und β^k sind Koeffizienten benutzt zur Bestimmung der Lösung, der Residuen und des Suchvektors. Der Algorithmus wird wie folgt dargestellt (vgl. Ferziger/Peric 2002: 109f):

- Initialisierung durch: $k = 0$, $\phi^0 = \phi_{in}$, $\rho^0 = Q - A\phi_{in}$, $p^0 = 0$, $s_0 = 10^{30}$
- Einfügen vom Zähler: $k = k + 1$
- Lösen des Systems: $Mz_k = \rho^{k-1}$
- Berechnung von: $s^k = \rho^{k-1} \cdot z^k$

$$\beta^k = s^k / s^{k-1}$$

$$p^k = z^k + \beta^k p^{k-1}$$

$$\alpha^k = s^k / (p^k \cdot Ap^k)$$

$$\phi^k = \phi^{k-1} + \alpha^k p^k$$

$$\rho^k = \rho^{k-1} - \alpha^k Ap^k$$

- Wiederholung bis zur Konvergenz.

Weil die Lösung unter einer bestimmten Anzahl von Iterationen konvergieren muss, wird die *conjugate* Gradient Methode durch eine Vorbedingung (*precondition*) in dem Gleichungssystem verbessert. Das ursprüngliche System wird durch eine Matrize C auf ein äquivalentes System transformiert (vgl. Ferziger/Peric 2002: 109f):

$$C^{-1}AC^{-1}C\phi = C^{-1}Q \quad (2.215)$$

Im Programm AVL Fire wird an dieser Stelle zur Bestimmung der Matrize A sogenannte *incomplete Cholesky factorization* benutzt (vgl. AVL 2011: 2-68):

$$A = LL^T$$

wo L eine untere Dreiecksmatrix ist:

$$L_{ii} = (a_{ii} - \sum_{k=1}^{i-1} L_{ik}^2)^{\frac{1}{2}}, i = 1, \dots, N \quad (2.216)$$

$$L_{ji} = \frac{1}{L_{ii}} (a_{ji} - \sum_{k=1}^{i-1} L_{ik}L_{jk}), j = i + 1, \dots, N \quad (2.217)$$

Die *conjugate* Gradient Methode kann für ein symmetrisches System, das z.B. Matrizen bei Diskretisierung der Poisson-Gleichung für Druck und Druckkorrektur darstellen, eingesetzt werden. Um die nichtsymmetrischen Gleichungen wie z.B. Gleichungen der Konvektion und Diffusion zu lösen, muss das asymmetrische Problem auf ein symmetrisches umgewandelt werden (vgl. Ferziger/Peric 2002: 110):

$$\begin{pmatrix} 0 & A \\ A^T & 0 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \psi \\ \phi \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Q \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.218)$$

Dieses System wird in zwei Subsysteme untergeteilt. Der erste stellt das Originalsystem dar und das zweite das mit der transponierten Matrize. Wenn dabei die preconditionierte *conjugate* Gradient Methode benutzt wird, dann wird diese Methode als *biconjugate gradients* bezeichnet. Wegen besserer Stabilität wird im AVL Fire Programm eine Variante der *biconjugate gradients* Methode, die sogenannte BiCGSTAB (*biconjugate gradients stabilized*) Methode für asymmetrische Systeme verwendet, deren Algorithmus wie folgt aussieht (vgl. Ferziger/Peric 2002: 110f):

- Initialeinstellung: $k = 0$, $\phi^0 = \phi_{in}$, $\rho^0 = Q - A\phi_{in}$, $u^0 = p^0 = 0$

- Einsetzen vom Zähler: $k = k + 1$ und berechnen: $\beta^k = \rho^0 \cdot \rho^{k-1}$
 $\omega^k = (\beta^k \gamma^{k-1}) / (\alpha^{k-1} \beta^{k-1})$
 $p^k = \rho^{k-1} + \omega^k (p^{k-1} - \alpha^{k-1} u^{k-1})$
- Lösen des Systems: $Mz = p^k$
- Berechnen: $u^k = Az$
 $\gamma^k = \beta^k / (u^k \cdot \rho^0)$
 $w = \rho^{k-1} - \gamma^k u^k$
- Lösen des Systems: $My = w$
- Berechnen: $v = Ay$
 $\alpha^k = (v \cdot \rho^k) / (v \cdot v)$
 $\phi^k = \phi^{k-1} + \gamma^k z + \alpha^k y$
 $\rho^k = w - \alpha^k v$
- Wiederholt bis es konvergiert.

Multigrid Methode

Bei der Multigrid Methode handelt es sich wieder um ein iteratives Verfahren. Diese Methode nutzt die Tatsache aus, dass die iterativen Methoden an einem größeren Gitter besser konvergieren. Deswegen wird ein Teil der Arbeit an einem größeren Gitter durchgeführt. Die Kontrollvolumina bei dem groben Gitter bestehen aus 2 in 1D, 4 in 2D und 8 in 3D Kontrollvolumina des feinen Gitters. Die Knoten bei dem groben Gitter liegen dann zwischen den Knoten des feinen Gitters. Die Methode wird an einem eindimensionalen Beispiel gezeigt (vgl. Ferziger/Peric 2002: 112f):

$$\frac{d^2 \phi}{dx^2} = f(x) \quad (2.219)$$

nach einer Approximation auf einem gleichförmigen Gitter:

$$\frac{1}{(\Delta x)^2} (\phi_{i-1} - 2\phi_i + \phi_{i+1}) = f_i \quad (2.220)$$

Nach Durchführung von n Iterationen auf einem Gitter mit Gitterweite Δx bekommt man eine approximierte Lösung ϕ^n , die die Gleichung im Rahmen des Residuums ρ^n erfüllt (vgl. Ferziger/Peric 2002: 113):

$$\frac{1}{(\Delta x)^2} (\phi_{i-1}^n - 2\phi_i^n + \phi_{i+1}^n) = f_i - \rho_i^n \quad (2.221)$$

subtrahiert man die (2.221) von der Gleichung (2.220), bekommt man:

$$\frac{1}{(\Delta x)^2} (\epsilon_{i-1}^n - 2\epsilon_i^n + \epsilon_{i+1}^n) = \rho_i^n \quad (2.222)$$

Diese Gleichung ist die Gleichung (2.211) für einen Knoten i und wird dann auf dem groben Gitter iteriert.

Beim Ableiten der diskretisierten Gleichungen an einem größeren Gitter erstreckt sich das Kontrollvolumen des Knotens I über das ganze Kontrollvolumen i und über die Hälften der Kontrollvolumina $i-1$ und $i+1$ des feinen Gitters siehe Bild 2.10. Auf Grund dieses Verhältnisses wird eine Hälfte der Gleichung (2.222) mit Indexen $i-1$ und $i+1$ zu einer ganzen Gleichung mit dem Index i addiert (vgl. Ferziger/Peric 2002: 113f):

Bild 2.10: Multigrid – feines und grobes Gitter. Wiederverwendung von Ferziger/Peric (2002) mit Genehmigung der Springer Nature Customer Service Center GmbH. © Springer Fachmedien Wiesbaden 2002.

$$\frac{1}{4(\Delta x)^2} (\epsilon_{i-1} - 2\epsilon_i + \epsilon_{i+1}) = \frac{1}{4} (\rho_{i-1} - 2\rho_i + \rho_{i+1}) \quad (2.223)$$

Aus der Beziehung zwischen zwei Gittern $\Delta X = 2\Delta x$ ergibt sich folgende Gleichung für grobes Gitter:

$$\frac{1}{(\Delta X)^2} (\epsilon_{I-1} - 2\epsilon_I + \epsilon_{I+1}) = \bar{\rho}_I \quad (2.224)$$

Die linke Seite der Gleichung ist die Approximation zu der zweiten Ableitung für das grobe Gitter, die rechte Seite stellt eine *smoothing* oder Filterung des feinen Gitters dar. Durch die Lineare Interpolation wird der Wert dann zurück auf das feine Gitter interpoliert. Bei einem Zweigitterverfahren sieht der Algorithmus so aus:

- An einem feinen Gitter werden Iterationen von einer Methode durchgeführt, die einen glatten Iterationsfehler wiedergibt,
- Residuen werden an dem feinen Gitter berechnet,
- Residuen werden an das grobe Gitter eingeschränkt,
- Iterationen von der Korrekturgleichung werden auf dem groben Gitter durchgeführt,
- Die Korrektur wird auf das feine Gitter interpoliert,
- Die Lösung wird auf dem feinen Gitter aktualisiert,
- Diese Prozedur wird wiederholt bis die Residuen unter ein gewünschtes Niveau senken.

Die Multigrid Methode ist ein Konvergenzakkelerator für innere Iterationen (lineare Probleme), sie kann aber auch bei gekoppelten Problemen verwendet werden. Sie kann also auch benutzt werden, um die äußeren Iterationen zu beschleunigen (vgl. Ferziger/Peric 2002: 114 und 118).

2.2.10. Randbedingungen

Die Abgrenzungen eines Rechengebietes sind entweder natürlicher Art (wie z.B. Wände oder Flächen), oder künstlich im Sinne, dass sie eine Abkürzung der realen Domäne darstellen, das Fluid kann durch sie ein- oder austreten. Solche Flächen werden als Einlass- (*inlet*), Auslass- (*outlet*) und Symmetrieebene (*symmetry*) bezeichnet (vgl. AVL 2011: 2-70).

Einlass

Man bezeichnet so eine Ebene durch die das Fluid in das Rechengebiet eintritt. Werte für die Geschwindigkeitskomponenten und abhängige Variable, Druck ausgenommen, werden vorgeschrieben. Diese Werte werden aus experimentellen Untersuchungen oder aus DNS Simulationen bestimmt. Bei fehlenden Angaben können die turbulenten Variablen aus der turbulenten Intensität freier Strömung abgeschätzt werden (vgl. AVL 2011: 2-70f):

$$I_\infty = \frac{u'}{U_\infty} = \frac{\sqrt{\overline{u'^2}}}{U_\infty} \Rightarrow k_b = \frac{3}{2} (I_\infty U_b)^2 \quad (2.225)$$

wo ∞ die Bedingungen der freien Strömung bezeichnet. Die Dissipationsrate an der Einlassebene wird aus der Kolmogorov-Beziehung bestimmt (vgl. AVL 2011: 2-70):

$$\epsilon_b = \frac{C_\mu^{3/4} k_b^{3/2}}{L_\epsilon} \quad (2.226)$$

wo $L_\epsilon / C_\mu^{3/4}$ ein Teil von der charakteristischen Länge, bzw. ein Zehntel von der Scherschichtbreite, oder der Domäne ist (vgl. AVL 2011: 2-70).

Auslass

Auslassrandbedingungen werden an den Domaingrenzen verwendet, durch die das Fluid austritt. Zwischen dem Knoten P und der Auslassfläche werden Gradienten aller Variablen in der normalen Richtung x_1 gleich Null angenommen. Diese Bedingung gilt unter der Voraussetzung, dass die Strömung voll entwickelt ist und der diffusive Fluss vernachlässigbar ist; die Auslassebene sollte also weit von einer Störung liegen (vgl. AVL 2011: 2-70; Jakirlic 2017c: 3).

$$\frac{\partial \phi}{\partial x_1} = 0, \quad \phi = u_i, p, \overline{u_i u_j}, \epsilon, k \quad (2.227)$$

Druckrandbedingung

An den Auslassebenen, wo das Fluid in die Domäne eintritt oder aus der Domäne austritt und die in einem freien Strömung liegen, wird der Druckfluss durch eine Druckrandbedingung bestimmt. Dabei wird die Geschwindigkeit in dem Knoten P auf die Fläche extrapoliert. Eine diskretisierte Bewegungsgleichung in y -Richtung für Knoten P lässt sich definieren als (vgl. Jakirlic 2017c: 3f):

$$V_P^* = H_P(V_k^*) + d_P^V(p_n^* - p_s^*) + S_P^V \quad (2.228)$$

$$\text{wo } H_P(V_k^*) = \frac{\sum_k A_k^V V_k^*}{A_P^V}; \quad d_P^V = -\frac{\delta x}{A_P^V}$$

Analog wird die diskretisierte Gleichung für die Geschwindigkeit V an der nördlichen Seite definiert:

$$V_n^* = H_n(V_k^*) + d_n^V(p_n^* - p_p^*) + S_n^V \quad (2.229)$$

Aus der Extrapolation von $H_P(V_k^*) + S_P^V$ auf die nördliche Fläche entsteht eine Gleichsetzung der Terme $H_P(V_k^*) + S_P^V = H_n(V_k^*) + S_n^V$; danach sieht die Gleichung für V_n wie folgt aus (vgl. Jakirlic 2017c: 4):

$$V_n^* = V_P^* - d_P^V(p_n^* - p_s^*) + d_n^V(p_n^* - p_p^*) \quad (2.230)$$

$$\text{dabei ist } d_n^V = 2d_P^V$$

Nach der SIMPLE Druckkorrektur hat die korrigierte Geschwindigkeit V an dem Knoten P und an der nördlichen Seite n folgende Form (vgl. Jakirlic 2017c: 4):

$$V_P^{**} = V_P^* + V_P' = V_P^* + d_P^V(p_n' - p_s') = V_P^* - d_P^V p_s' \quad (2.231)$$

$$V_n^{**} = V_n^* + V_n' = V_n^* + d_n^V(p_n' - p_p') = V_n^* - d_n^V p_p' \quad (2.232)$$

Symmetrie

Bei einer Symmetrieebene außer dem Gradient der radialen Geschwindigkeit und der Scherspannung werden Gradienten aller Variablen in der zur Symmetrieachse normalen Richtung x_2 zu Null gesetzt. Der Massenfluss in der x_2 Richtung ist ebenso Null, woraus sich die zur Achse normale Geschwindigkeit als Null ergibt (vgl. Jakirlic 2017c: 5):

$$\frac{\partial \phi}{\partial x_2}, \bar{u}_2, \overline{u_1' u_2'} = 0, \quad \phi = \bar{u}_1, p, \overline{u_1' u_1'}, \varepsilon, k \quad (2.233)$$

$$\frac{\partial \bar{u}_2}{\partial x_2}, \frac{\partial \overline{u_1' u_2'}}{\partial x_2} \neq 0 \quad (2.234)$$

Wenn eine Symmetrieebene an einer Stelle, wo keine natürliche Symmetrie herrscht, verwendet wird, sollte es getan werden, wo oben genannten Bedingungen gelten, also z.B. parallel mit freier Strömung (vgl. AVL 2011: 2-72).

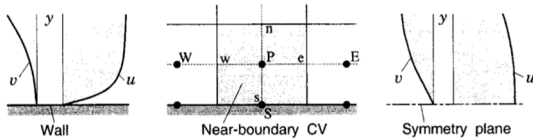
Wand

Auf der Wand gilt eine *no-slip* Randbedingung, das heißt die Geschwindigkeit des Fluides entspricht der Geschwindigkeit an der Wand. Eine andere Randbedingung, die aus der Kontinuitätsgleichung an der Wand $x_2 = 0$ folgt, ist, dass die normale viskose Spannung an der Wand gleich Null ist (vgl. Ferziger/Peric 2002: 204f).

$$\left(\frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_1}\right)_{\text{Wand}} = 0 \implies \left(\frac{\partial \bar{u}_2}{\partial x_2}\right)_{\text{Wand}} = 0 \implies \tau_{x_2 x_2} = 2\mu \left(\frac{\partial \bar{u}_2}{\partial x_2}\right)_{\text{Wand}} = 0 \implies F_S^d = \int_{S_e} \tau_{x_2 x_2} dS = 0 \quad (2.235)$$

Die Scherspannung wird dann als einseitige Approximation berechnet (vgl. Ferziger/Peric 2002: 205):

$$F_S^d = \int_{S_e} \tau_{x_1 x_2} dS = \int_{S_e} \mu \frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_2} dS \approx \mu_S S_S \frac{\bar{u}_{1P} - \bar{u}_{1S}}{x_{2P} - x_{2S}} \quad (2.236)$$



Bei einer Symmetrieebene gilt es umgekehrt, die Scherspannung ist Null, aber die normale Spannung ist nicht gleich Null (vgl. Ferziger/Peric 2002: 205):

$$\left(\frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_2}\right)_{sym} = 0 ; \left(\frac{\partial \bar{u}_2}{\partial x_2}\right)_{sym} \neq 0 \quad (2.237)$$

Bild 2.11: Randbedingungen an der Wand und Symmetrieebene. Wiederverwendung von Ferziger/Peric (2002) mit Genehmigung der Springer Nature Customer Service Center GmbH. © Springer Fachmedien Wiesbaden 2002.

Slip Wand

Bei dieser Randbedingung ist die Wandschubspannung und normale Geschwindigkeit an der Wand gleich Null. Die radiale Geschwindigkeit entspricht dann ihrem Äquivalent im Knoten P (vgl. AVL 2011: 2-76):

$$\left(\frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_2}\right)_{slip} \neq 0 ; \left(\frac{\partial \bar{u}_2}{\partial x_2}\right)_{slip} = 0 \quad (2.238)$$

2.3. Fahrzeugumströmung

Bei einem Kraftfahrzeug bei Annahme ruhender Luft ist die Fahrzeuggeschwindigkeit gleich der Anströmgeschwindigkeit V_∞ in auf das Fahrzeug bezogenem Koordinatensystem (vgl. Hucho 2005: 81).

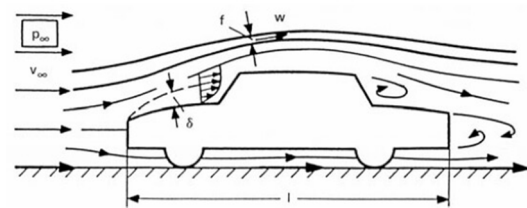


Bild 2.12: Darstellung einer Fahrzeugumströmung. Wiederverwendung von Hucho (2005) mit Genehmigung der Springer Nature Customer Service Center GmbH. © Springer Fachmedien Wiesbaden 2005.

Außer der Ablösungsbereiche entsteht an der Oberfläche eine dünne Grenzschicht, wo Viskositätseffekte überwiegen sind. Außerhalb der Grenzschicht verhält sich die Strömung als reibungsfrei wäre. Aus dieser Strömung entstehender Druck formt die Grenzschicht. In der Grenzschicht fällt die Geschwindigkeit der Außenströmung auf Null an der Wand ab. Bei einer Ablösung entstehen Rückström- und Totwassergebiete. In einem auf das Fahrzeug bezogenen Koordinatensystem ist die Fahrbahn eine mitbewegte Wand ohne Grenzschicht. Die Druckverteilung an dem Unterboden beeinflusst dennoch die Strömung in der Wandnähe. Diese Phänomene stellen wichtige Faktoren bei einer Simulation der Fahrzeugumströmung in dem Windkanal dar (vgl. Hucho 2005: 81).

2.3.1. Fahrzeugwiderstände

Druckbeiwert

Bei einer reibungsfreien und inkompressiblen Strömung sind die Trägheits- und Druckkräfte im Gleichgewicht. Die Bernoullische Gleichung zeigt das Verhältnis zwischen Druck p und Geschwindigkeit U :

$$g = p + \frac{\rho}{2} U^2 = const. \quad (2.239)$$

wo p der statische Druck,
 $\rho U^2/2$ der dynamische Druck, oder auch Staudruck,
 g der Totaldruck sind (vgl. Hucho 2005: 83).

Aus der Gleichung (2.239) ist deutlich, dass an Stellen mit hoher Strömungsgeschwindigkeit v ist der Druck p niedriger und umgekehrt. Auf der Vorderseite eines umströmten Körpers kommt die Strömung zur Ruhe, es entsteht ein sogenannter Staupunkt. An diesem Punkt ist die Strömungsgeschwindigkeit $U = 0$ und damit der statische Druck gleich dem Totaldruck g . Staupunkt ist also eine Stelle mit dem höchsten statischen Druck, was in einem Strömungsfeld entstehen kann (vgl. Hucho 2005: 83).

Die Bernoullische Gleichung für eine Fahrzeugumströmung mit einer Anströmgeschwindigkeit U_∞ , wo ein statischer Druck p_∞ herrscht, hat folgende Form (vgl. Hucho 2005: 83):

$$g = p_\infty + \frac{\rho}{2} U_\infty^2 = \text{const.} \quad (2.240)$$

Durch eine Betrachtung der Bernoullischen Gleichung in der Anströmung und in einem anderen beliebigen Punkt entsteht ein Verhältnis, das man als der dimensionslose Druckbeiwert nennt (vgl. Hucho 2005: 83f):

$$p + \frac{\rho}{2} U^2 = p_\infty + \frac{\rho}{2} U_\infty^2 \quad (2.241)$$

$$c_p = 1 - \left(\frac{U}{U_\infty}\right)^2 = \frac{p - p_\infty}{\frac{\rho}{2} U_\infty^2} \quad (2.242)$$

In dem Staupunkt, wo die Geschwindigkeit $U = 0$ ist, ist der dimensionslose Druckbeiwert $c_p = 1$ (vgl. Hucho 2005: 84).

Luftwiderstandsbeiwert

Widerstand eines stumpfen Körpers besteht aus einem Reibungswiderstand und aus einem Druckwiderstand (vgl. Hucho 2005: 91):

$$W = W_D + W_R \quad (2.243)$$

Bei dem Reibungswiderstand entstehen durch die molekulare Viskosität Geschwindigkeitsgradienten in der Wandnähe, die in Form einer Schubspannung τ_w auf die Wand wirken. Integriert man die Kraft über Fläche, bekommt man die Gleichung für den Reibungswiderstand (vgl. Hucho 2005: 89):

$$W_R = \oint \tau_w \cos \varphi \, dS \quad (2.244)$$

An der Rückseite eines stumpfen Körpers entstehen große Druckanstiege, die Strömung wird verzögert, es kommt zu einer Ablösung. Die Stromlinien müssen die Wand verlassen, es kann auch eine Rückströmung auftreten. Aus Integration des Druckes über die Fläche ergibt sich der Druckwiderstand (vgl. Hucho 2005: 88 und 91):

$$W_D = \oint p \sin \varphi \, dS \quad (2.245)$$

Der Luftwiderstandsbeiwert ist dann auf den Staupunkt $\rho U_\infty^2 / 2$ und auf die Projektionsfläche A bezogen (vgl. Hucho 2005: 91):

$$c_W = \frac{W}{\frac{\rho}{2} U_\infty^2 A} \quad (2.246)$$

Bei heutigen Personenwagen mit einem rauen Unterboden beträgt der Reibungswiderstand etwa ein Drittel des Gesamtwiderstandes. Bauteile wie Seitenwände, das Dach und der Unterboden sind durch reinen Reibungswiderstand geprägt. Dagegen an dem Vorderteil, an der Heckschräge und am senkrechten Heckabschluss überwiegt der Druckwiderstand (vgl. Hucho 2005: 88 und 172f). Die Tatsache, dass der Widerstand bei heutigen Personenwagen unabhängig von der Reynolds-Zahl ist, zeigt, dass der Widerstand überwiegend der Druckwiderstand ist (vgl. Hucho 2005: 92). Für die Größe des Widerstandes ist die Formgebung vor dem größten Querschnitt und wie die ankommende Strömung geteilt wird nicht so wichtig, weil der größte Beitrag von der Rück- und Unterseite kommt. Wichtig ist, wie die Strömung wieder zusammengeführt wird, damit das Totwasser möglichst klein bleibt (vgl. Hucho 2005: 94).

2.3.2. Wirkende Kräfte und Momente

Auf das Fahrzeug wirkt in Strömungsrichtung eine Widerstandskraft F_x , seitlich eine Seitenkraft F_y und vertikal eine Auftriebskraft F_z . Zu einem Bezugspunkt in der Mitte des Radstandes auf der Bodenebene entsteht um die Längsachse (x-Achse) ein Rollmoment M_x , um die Querachse (y-Achse) ein Nickmoment M_y und um die Hochachse (z-Achse) ein Giermoment M_z (vgl. Hucho 2005: 95).

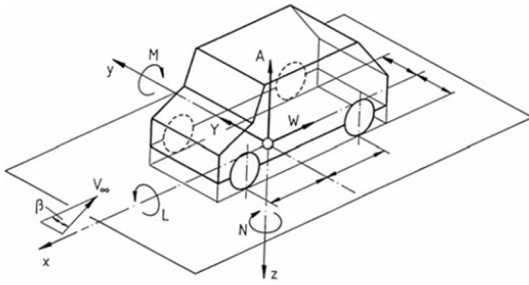


Bild 2.13: Bezugssystem mit wirkenden Kräften und Momenten. Wiederverwendung von Hucho (2005) mit Genehmigung der Springer Nature Customer Service Center GmbH. © Springer Fachmedien Wiesbaden 2005.

Die dazu entsprechenden Beiwerte werden auf den Staupunkt und die Projektionsfläche, bei den Momenten noch auf den Radstand l bezogen (vgl. Hucho 2005: 95f):

$$c_x = \frac{F_x}{\frac{\rho}{2} U_\infty^2 A} \quad c_y = \frac{F_y}{\frac{\rho}{2} U_\infty^2 A} \quad c_z = \frac{F_z}{\frac{\rho}{2} U_\infty^2 A} \quad (2.247)$$

$$c_{M_x} = \frac{M_x}{\frac{\rho}{2} U_\infty^2 A l} \quad c_{M_y} = \frac{M_y}{\frac{\rho}{2} U_\infty^2 A l} \quad c_{M_z} = \frac{M_z}{\frac{\rho}{2} U_\infty^2 A l} \quad (2.248)$$

Fahrzeug mit niedrigem Luftwiderstand ist seitenwindempfindlich. Frontantrieb verringert diese Empfindlichkeit durch bessere Richtungsstabilität (vgl. Hucho 2005: 286f). Beim Reduzieren vom Luftwiderstand erhöht sich das Giermoment (vgl. Hucho 2005: 286). Zum Beispiel Abrundungen der C-Säulen und der Dachkante bei einem Schrägheck reduzieren zwar den Widerstand, erhöhen aber das Giermoment. Das gleiche gilt auch für die Heckverlängerung, dabei die Vergrößerung der Seitenfläche nicht zu einem Anstieg der hinteren Seitenkraft führt. Der Anstieg des Giermoments wird durch Vergrößerung des seitlichen Ablösungsgebietes hinter dem verlängerten Kofferraum verursacht (vgl. Hucho 2005: 327f).

Mit Zunahme der Seitenkraft steigt auch das Rollmoment (vgl. Hucho 2005: 309).

Die Richtungsstabilität wird wesentlich stärker vom Giermoment als von der Seitenkraft bestimmt. Vom Fahrer wird mehr ein Gieren als ein Parallelversatz wahrgenommen (vgl. Hucho 2005: 315).

Bei hohen Geschwindigkeiten Auftrieb entlastet die Hinterachse, was die Richtungsstabilität verschlechtert. Wenn der Auftrieb an der Hinterachse deutlich größer als an der Vorderachse ist, verhält sich das Fahrzeug übersteuernd (vgl. Hucho 2005: 296ff).

Hohe Luftkräfte an Nutzfahrzeugen sind im Vergleich zum PKW durch deutlich größere Projektionsfläche und durch einen erhöhten c_W -Wert verursacht. Auch die tangentialen Kräfte bei Schräganströmung weisen auf den LKW mit steigendem Schiebewinkel eine stärkere Wirkung auf (vgl. Hucho 2005: 643f). Der Luftwiderstand bei Nutzfahrzeugen nimmt an Bedeutung im Fernverkehr bei höheren Geschwindigkeiten. Bei einem Sattelzug auf einer ebenen Autobahn beträgt der Luftwiderstand zirka 30% des gesamten Fahrwiderstandes (vgl. Hucho 2005: 635f).

Bei größeren Relativgeschwindigkeiten nehmen die dynamischen Effekte zu, der transiente Vorgang des Überholens weist eine Zunahme von Giermoment und Seitenkraft auf im Vergleich zu der Untersuchung mit statischen Positionen (vgl. Hucho 2005: 348f).

2.3.3. Strömungsablösungsarten am Fahrzeug

Eine Fahrzeugumströmung ist von zahlreichen Ablösungen geprägt. Die Ablösungen, die auf einem Fahrzeug auftreten, lassen sich in zwei verschiedene Typen unterscheiden. Ablösung an einer zur lokalen Strömungsrichtung quer liegenden Kante und eine Ablösung wenn die Kontur gegenüber der Strömung schräg liegt (vgl. Hucho 2005: 92).

Ist die Ablösekante quer zur Strömungsrichtung, entstehen Wirbel, die mit ihren Achsen quer zur Anströmung liegen. Die Strömung im Ablösungsgebiet ist instationär. Durch die starken Austauschvorgänge dissipiert die kinetische Energie schnell, was mit einem Druckverlust hinter dem Körper verbunden ist. Es entsteht ein Totwassergebiet, wo ein Unterdruck und niedrige Geschwindigkeiten herrschen (vgl. Hucho 2005: 93). Jedes Fahrzeug zieht ein Totwasser hinter sich her, das in den Nachlauf übergeht; die Anströmgeschwindigkeit des nachfolgenden Fahrzeugs wird dadurch vermindert. Dieser Effekt nennt man Windschattenfahren. Hinter einem Nutzfahrzeug ist dieser Effekt stark ausgeprägt, sogar bei größeren Folgenabständen wirksam (vgl. Hucho 2005: 678).

Das Totwasser kann nichtperiodisch, periodisch und ringförmig sein (vgl. Hucho 2005: 161).

- Bei einem nichtperiodischen Totwasser löst sich die Grenzschicht an einer Kante ab, geht in eine Scherschicht über und wird später wieder angelegt. Im Totwasser bildet sich eine Rezirkulationszone

mit einem Querwirbel. Als Beispiel kann man an dieser Stelle eine Stufenströmung nennen. Am PKW entsteht eine Ablösung mit nichtperiodischen Totwasser an führenden Kanten, beim Stufenheck an der Dach-Hinterkante (vgl. Hucho 2005: 162f).

- Ein periodisches Totwasser entsteht, wenn sich die Strömung an zwei gegenüber liegenden Kanten ablöst. Die beiden Grenzschichten gehen in freie Scherschichten über, die in einem freien Staupunkt aufeinander treffen und grenzen somit das Totwasser ab. Im Totwasser entstehen zwei gegenläufige Wirbel, die sich periodisch wechselnd bilden und zwischen denen ein Queraustausch stattfindet. Stromabwärts bildet sich ein Nachlauf, wo sich die Strömung wieder ausgleicht. Ablösung hinter einem Vollheckfahrzeug z.B. einem LKW ist aber nicht periodisch, sondern stochastisch (vgl. Hucho 2005: 163f).
- Ein Totwasser mit ringförmigem Wirbel entsteht bei rotationssymmetrischen oder dazu ähnlichen Körpern wie z.B. bei Außenspiegeln. Zeitlich gemittelt bildet sich ein Ringwirbel aus dem sich spiralförmig freie Wirbel lösen (vgl. Hucho 2005: 164).

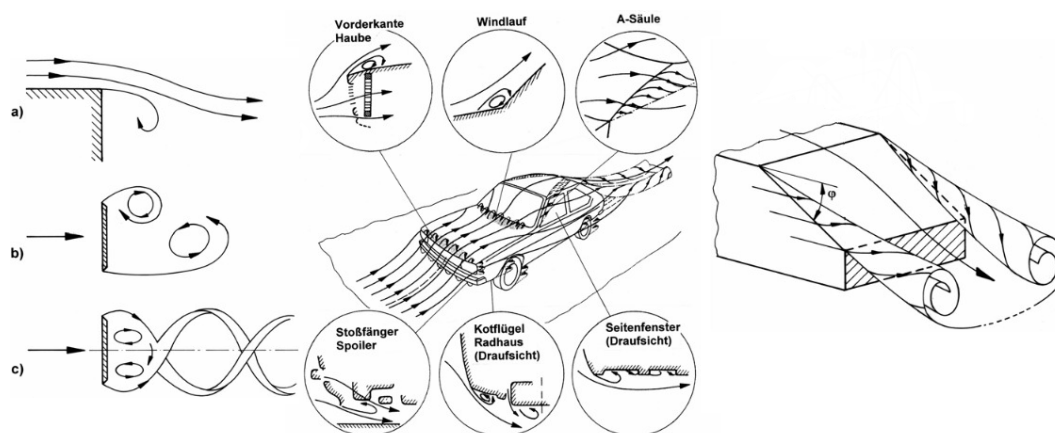


Bild 2.14: Ablösungsgebiete an einem PKW (Mitte), Querwirbel (links) a) nichtperiodisch, b) periodisch, c) ringförmig, Längswirbel (rechts). Wiederverwendung von Schütz (2013) mit Genehmigung der Springer Nature Customer Service Center GmbH. © Springer Fachmedien Wiesbaden 2013.

Bei einer schrägen Kante stoßen zwei Scherschichten aufeinander, sie lösen sich ab und rollen sich in einen Längswirbel auf, dessen Achse parallel zur Ablösekante verläuft. Die Ablösung ist dreidimensional und stationär. Längswirbel entstehen meistens an den A- und C-Säulen. Durch ihre hohe Umfangsgeschwindigkeit kommt an den Seitenscheiben eines PKWs zum Windgeräusch. An der Heckschräge erzeugen sie hohe Unterdrucke, die eine Erhöhung des Widerstands und des Auftriebs an der Hinterachse verursachen (vgl. Hucho 2005: 164f). Hinter dem Körper entstehen geringe Druckverluste, dennoch die Längswirbel viel kinetische Energie beinhalten, die durch die Fahrleistung überwinden werden muss (vgl. Hucho 2005: 93).

Eine Ablösung verhält sich nur zeitlich gemittelt als stationär, bei einer Momentaufnahme handelt es sich um ein chaotisches Verhalten. In einem nichtperiodischen und periodischen Totwasser entstehen große Schwankungsgeschwindigkeiten. In der Scherschicht bilden sich nach der Ablösung Wirbel, die stromabwärts in den Nachlauf ablaufen; dabei ändert sich die Länge des Totwassers, das Totwasser pulsiert. Bei bestimmten Fällen bildet sich hinter dem Körper eine Karmansche Wirbelstraße (vgl. Hucho 2005: 165ff). Eine Momentaufnahme von einem Längswirbel weist einen chaotischen Charakter auf. In dem Strömungsfeld treten gegenläufig drehende Wirbel zu unterschiedlichem Zeitpunkt an unterschiedlichem Ort auf. Erst nach einer zeitlichen Mittelung lässt sich eine Wirbeltüte erkennen (vgl. Hucho 2005: 169).

2.3.4. Teilwiderstände

Bei der Fahrzeugentwicklung werden Einzelteile des Fahrzeugs so optimiert, dass ihre Teilwiderstände reduziert werden. Die Vorgehensweise folgt die Strömungsrichtung, damit die Interferenzen stromabwärts berücksichtigt werden können (vgl. Hucho 2005: 179).

Vorderwagen

Bei Umströmung eines Vorderwagens ist das Ziel eine Ablösung zu vermeiden. Dabei wird im Längsmittelschnitt auf die Neigung und Radius der Motorhaube, die Neigung des vorderen Abschlussblechs und auf den Übergang in den Unterboden geachtet. In der Draufsicht kommen dazu die Pfeilung und der Übergang zu den Kotflügeln. Mit zunehmendem Radius an einer Führungskante sinkt der Widerstand bis zu einem Wert, ab dem er konstant bleibt. Dabei reichen relativ kleine Rundungen, um eine Ablösung zu vermeiden (vgl. Hucho 2005: 181f). Im Fall einer Ablösung erhöht sich an der Stelle schlagartig der Druck und somit steigt auch der Widerstand (vgl. Hucho 2005: 180). Dank der Bodennähe verliert der Körper seine Rotationsymmetrie, die Strömung weicht überwiegend nach oben ab; damit ist der Staupunkt nach unten versetzt. Mit einem tieferliegenden Staupunkt wird der Widerstand niedriger (vgl. Hucho 2005: 180 und 185). Die Haubenneigung weist ähnliches Verhalten auf; schon bei leichter Neigung sinkt der Widerstand nicht mehr ab. Die Haubenneigung reduziert den Widerstand nur durch Zusammenwirkung mit der Neigung der Windschutzscheibe, womit die Strömung über den Windlauf und zum Dach besser geführt wird und sich erst weiter stromabwärts ablöst (vgl. Hucho 2005: 183). Ablösung an einer Kante lässt sich nicht nur durch eine Rundung, sondern auch durch eine Fase erfolgreich vermeiden (vgl. Hucho 2005: 185).

Windschutzscheibe, A-Säule, Dach

Parameter, die hier den Widerstand beeinflussen, sind die Neigung und die Wölbung der Windschutzscheibe, Abrundung der A-Säule (vgl. Hucho 2005: 188). Der Winkel, den die Haube mit der Windschutzscheibe einschließt, bestimmt die Größe des Wirbels, der in dem Windlauf entsteht. Je größer dieser Winkel ist, desto kleiner wird die Ablösungsblase (vgl. Hucho 2005: 188f). Bei einer Ablösung in dem Windlauf handelt es sich um einen Querwirbel, der entweder seitlich als Längswirbel abfließt, oder wenn seine Stärke über die Breite nicht konstant wird, als zahlreiche Längswirbel flächig über die Windschutzscheibe abgeht (vgl. Hucho 2005: 188). Die Neigung der Windschutzscheibe reduziert den Widerstand auch damit, dass weniger Luft zu den A-Säulen geleitet wird, wo sonst energiehaltige Wirbeltüten entstehen. Sie werden auf dem Dach umgeleitet und als Längswirbel fließen sie über das Dach ab (vgl. Hucho 2005: 188 und 190). Die Querwölbung der Windschutzscheibe und die Abrundung der A-Säule tragen zu der Widerstandsminderung bei, wenn sie die Ablösung an den A-Säulen reduzieren (vgl. Hucho 2005: 190). Beim heutigen PKW sollte an dem Übergang zwischen der Windschutzscheibe und dem Dach zu keiner Ablösung kommen. Sie würde verursachen, dass die abgelöste Strömung an der Dachvorderkante sich nicht wieder an das Dach anlegt, was einen erhöhten Widerstand zur Folge hätte (vgl. Hucho 2005: 188). Eine stärker geneigte Windschutzscheibe ermöglicht einen glatteren Übergang zum Dach mit kleiner Unterdruckspritze, der Druckanstieg stromabwärts ist weniger steil, was zu kleinerem Impulsverlust führt (vgl. Hucho 2005: 190). Durch die Wölbung des Daches in Längsrichtung kann ebenso der Widerstand reduziert werden. Dabei bekommen die Übergänge von der Windschutzscheibe und zur Heckscheibe große Krümmungsradien, womit die Unterdruckspitzen abgeschwächt werden. Der höchste Punkt der Wölbung sollte möglichst vorne positioniert werden; der Druckanstieg stromabwärts wird dann flacher und damit die Ablösungsgefahr kleiner (vgl. Hucho 2005: 193).

Grundriss und Seitenteile

Durch das Auswölben der Seitenteile wird der Winkel zum Bug stumpfer und der Übergang zum Heckenzug glatter. Damit wird die Ablösungsgefahr ebenso kleiner. Der Widerstand sinkt dann, wenn dabei die Größe der Projektionsfläche beibehalten bleibt (vgl. Hucho 2005: 218). Um den Druck am Ende des Körpers groß halten, wird ein Einzug an den Seiten, so genanntes Boattailing angewandt (vgl. Schütz 2012a: 5-95). Türgriffe und Leisten, die in der Strömungsrichtung verlaufen, erhöhen den Widerstand nicht. Dagegen quer stehende Leisten oder Vertiefung der Seitenscheiben haben auf den Widerstand einen negativen Einfluss (vgl. Hucho 2005: 219). Ein weiteres Störungselement an der Fahrzeugseite ist der Außenspiegel. Dabei ist seine Größe, Form und Anbindung an die Karosserie zu beachten. Seine volle und runde Form mindert die Unterdruckspitzen (vgl. Schütz 2012a: 5-109). Hinter dem Seitenspiegel bildet sich ein langer und breiter Nachlauf, der mit den Wirbeln an der Seitenscheibe und mit dem Längswirbel aus der A-Säule interferiert. An dem Außenspiegel befindet sich meistens eine Abweiskante, die die Strömung weg von der Seitenscheibe umlenkt (vgl. Hucho 2005: 245). Eine Rundung der C-Säule trägt zur Reduzierung des Widerstands durch den Druckanstieg am Heck ebenso wie Boattailing aber auch durch das Abschwächen des auf der C-Säule auftretenden Längswirbels bei (vgl. Hucho 2005: 220).

Unterboden, Radhäuser und Räder

Widerstand des Unterbodens, der Räder und Radhäuser stellt mehr als ein Viertel des gesamten Widerstandes dar. Bei Untersuchung dieser Komponenten ist von großer Bedeutung die Relativbewegung zwischen dem Wagen und der Straße genauso wie die Drehbewegung der Räder treu nachzustellen (vgl. Hucho 2005: 220).

Der Unterboden ist durch Konstruktionsteile wie z.B. Lenker, Abgasanlage, Tank, Reserveradmulde sehr rau, wodurch der Reibungswiderstand überwiegt. Um den Widerstand zu reduzieren, werden an dem Unterboden verschiedene Verkleidungen angebracht, um ihn so glatt wie möglich zu gestalten (vgl. Hucho 2005: 222f). An ausgeprägten Widerstandquellen kann mit Spoilern gearbeitet werden, somit durch Radspoiler vor den Vorder- und Hinterrädern der Widerstand von Rädern reduziert werden kann (vgl. Schütz 2012a: 5-106). Durch einen Heckdiffusor lassen sich Widerstand und Auftrieb an der Hinterachse reduzieren; dabei muss die Diffusor- und die Dachströmung aufeinander abgestimmt werden. Bei zu steilem Diffusorwinkel kann an der Diffusorkante zur Ablösung kommen (vgl. Schütz 2012a: 5-106).

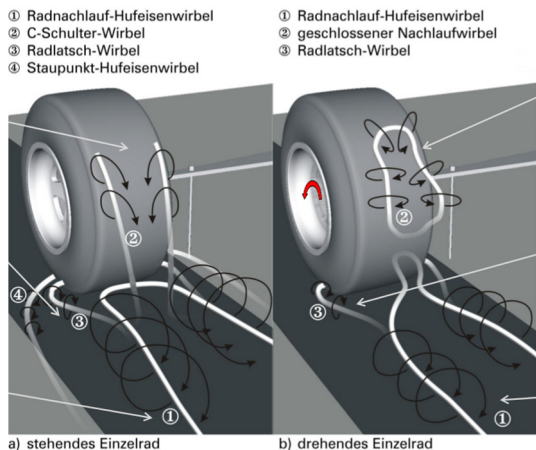


Bild 2.15: Radumströmung – a) stehendes b) rotirendes Rad (Schütz 2012b: 35)

kleineren Auftrieb als ein stationäres Rad auf (vgl. Hucho 2005: 229).

Wenn das Rad von dem Boden angehoben wird, ändert sich der Druckverlauf komplett. Anstatt eines Überdruckes vor dem Rad, wie bei einem Rad mit Bodenkontakt üblich ist, bildet sich in dem Spalt zwischen dem Rad und dem Boden ein Unterdruckgebiet, verbunden mit einem niedrigeren Widerstand und Auftrieb (vgl. Hucho 2005: 875).

Bei einem Rad im Radhaus wird nur der untere Teil ähnlich umgeströmt wie beim isolierten Rad auf dem Boden. Vorne auf dem Radhaus wird die Strömung nach oben gerichtet. Ein Teil der Strömung geht als Längswirbel über den Kotflügel ab, wo sich auch eine Ablöseblase bildet. Ein anderer Teil wird an die Innenseite des Radhauses geleitet und tritt an dem Unterboden aus. Die Dicke der mitgeschleppten Luft ist so klein, dass es die Strömung im Radhaus nicht beeinflusst; die Strömung im Radhaus resultiert ausschließlich aus der Umströmung des Körpers. Der Unterschied vom Widerstand und Auftrieb zwischen rotierendem und stationärem Rad im Radhaus ist deutlich kleiner als bei einem isolierten Rad (vgl. Hucho 2005: 230ff). Durch die Form des Vorderwagens und durch die austretende Kühlluft werden die Vorderräder schräg angeströmt; die Strömung löst sich an ihren Außenseiten ab, was den Widerstand wesentlich erhöht (vgl. Hucho 2005: 221). Viel nach vorne angebrachtes Radhaus befindet sich in einem Unterdruckgebiet, durch seine Öffnung wird mehr Luft eingesaugt (vgl. Hucho 2005: 232). Die Schräganströmung wird an den Hinterrädern weniger ausgeprägt (vgl. Hucho 2005: 221).

Heck

Der Luftwiderstand ist durch den Verlauf der Strömung am Fahrzeugheck signifikant beeinflusst. Im Laufe der Fahrzeugentwicklung dominieren drei Heckformen: Vollheck, Fließheck, Stufenheck (vgl. Hucho 2005: 195).

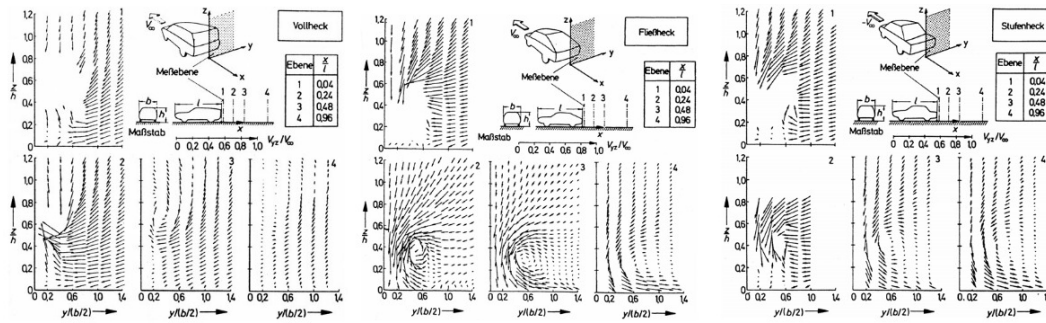


Bild 2.16: Strömungsfelder hinter einem Vollheck (links), Fließheck (Mitte), Stufenheck (rechts) in jeweils vier $x = \text{const.}$ Ebenen. Wiederverwendung von Hucho (2005) mit Genehmigung der Springer Nature Customer Service Center GmbH. © Springer Fachmedien Wiesbaden 2005.

Bei einem Vollheck ist die Fahrzeughöhe genauso groß wie die Breite. Die Neigung des Daches, des Unterbodens und der Seitenflächen kann variieren. Das hintere Abschlussblech kann ebenso schräg gestellt werden (vgl. Hucho 2005: 196). Hinter dem Vollheck angesehen von dem Längsmittelschnitt bilden sich im Totwasser nach zeitlicher Mittelung zwei gegenläufige Wirbel, die auch unterschiedlich ausgeprägt sein können. In der Draufsicht sind ebenso zwei Wirbel sichtbar. Beide zeitlich gemittelten Beobachtungen stellen Spuren von einem großen Ringwirbel dar. Das Totwasser wird durch eine Scherschicht umhüllt, in der sich Ringwirbel bilden, wachsen und später in den Nachlauf ablösen. In der x -Ebene ist nach zeitlicher Mittelung ein hoch liegend, auswärts drehendes Längswirbelpaar sichtbar (vgl. Hucho 2005: 197f). Bei einer Momentaufnahme pulsiert das Totwasser und die Wirbel formieren sich stochastisch (vgl. Hucho 2005: 198). Der Unterdruck im Totwasser wird an die Hinterseite des Körpers übertragen, was für den Widerstand maßgeblich ist. Um den Widerstand zu reduzieren, wird die Fläche verkleinert (vgl. Hucho 2005: 198). Dies kann durch das Boattailing – die Seitenflächen werden nach hinten verjüngt, erreicht werden, oder wenn das Dach und der Unterboden nach innen eingezogen werden. Das Boattailing kann auch bei Fließheck und Stufenheck verwendet werden. Dabei muss bei der Neigung geachtet werden, dass sich die Strömung nicht schon an den Seiten ablöst, womit zu einer Erweiterung des Totwassers kommen würde (vgl. Hucho 2005: 200f). Bei einem stärkeren Herunterziehen des Daches bei Vollheckfahrzeugen nimmt der Widerstand zu, weil sich die Strömung schon vor der Dachhinterkante ablöst. Das Einziehen an der Unterseite wird durch ein Diffusor realisiert (vgl. Hucho 2005: 201f).

Das Fließheck ist entweder durch eine lange Schräge und ein kurzes Abschlussblech, oder durch eine kurze Schräge mit hoher Basis, was dem Vollheck ähnelt, bestimmt (vgl. Hucho 2005: 202). Hinten entsteht ganz andere Strömung als beim Vollheck. Hinten bildet sich deutlich kleines Totwasser von Längsmittelschnitt angesehen wieder mit zwei gegenläufigen Wirbeln, die einen Schnitt durch den Ringwirbel darstellen (vgl. Hucho 2005: 202). Die Strömungsbildung ist durch den Neigungswinkel der Schräge bestimmt. Bei einem Neigungswinkel bis etwa 5° fließt die Strömung genauso wie beim Vollheck; die Längswirbel sind hoch positioniert und rotieren auswärts. Bei zunehmender Neigung ändert sich die Richtung der Drehung, das Längswirbelpaar rotiert einwärts und liegt tiefer. Der Widerstand nimmt bis zu einem Minimum bei etwa 15° ab, danach steigt er wieder an. Verläuft der Übergang zwischen Dach und Schräge mit einem großen Radius, lässt sich dort die Strömung nicht ab, andererseits bildet sich an dieser Stelle eine Blase, die mit steigendem Neigungswinkel zunimmt. Bei einem kritischen Neigungswinkel bei etwa 30° bilden sich die größten Heckwirbel, dadurch der größte Widerstand entsteht. Nach diesem Punkt platzen die Randwirbel auf, an den schrägen Kanten bilden sich zahlreiche Längswirbel, die sogar die Entstehung des Ringwirbels verhindern können. Die Strömungsform nähert sich wieder der beim Vollheck. Durch die Einwärtsdrehung des Längswirbelpaars wird die Strömung aus dem Dach nach unten gezogen und ein Abwind induziert, damit das Totwasser hinter das Abschlussblech zusammengedrückt wird (vgl. Hucho 2005: 203-206). Bei dem durch Längswirbel erzeugten Widerstand handelt es sich ausschließlich um Druckwiderstand, dabei der zunehmende Auftrieb die Hinterachse entlastet und ein Nickmoment verursacht (vgl. Hucho 2005: 204 und 207). Auch bei Fließheckformen wird der Einzug von den Heckseiten (Boattailing) und dem Boden (Heckdiffusor) benutzt, um den Widerstand zu reduzieren. Weiterhin kann durch das Modifizieren der Abrundung vom Dach zur Schräge, des Radius der C-Säulen und der vertikalen Neigung der Seitenteile, der Höhe des Hecks, oder auch durch das Verlängern der Schräge der Widerstand weiter verkleinert werden (vgl. Hucho 2005: 208-211).

Die Geometrie des Stufenhecks ist durch Neigung und Länge des Heckfensters, Länge und Höhe des Kofferraums und durch Rundung der Seitenteile und der C-Säule definiert. Das Seitenverhältnis der Breite zur Länge des Heckfensters ist mehrfach größer als bei Fließheck. Der Kofferraumdeckel ist meistens auch leicht geneigt (vgl. Hucho 2005: 212 und 214). Das Stufenheck lässt sich in drei Formen unterteilen.

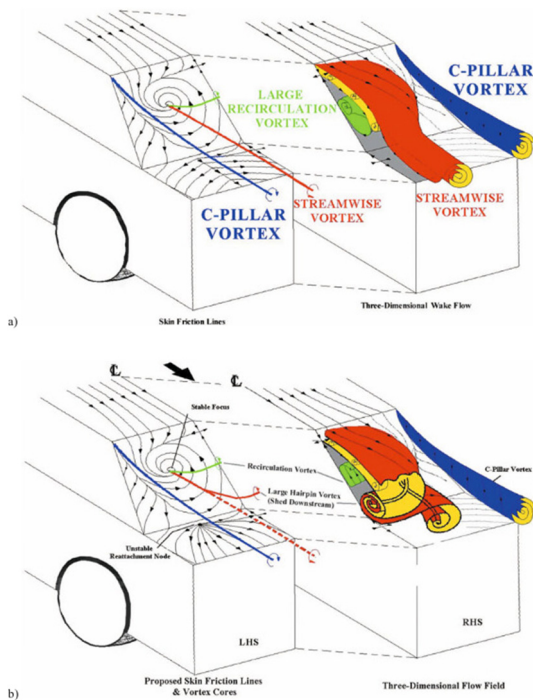


Bild 2.17: Strömungstopologie - a) zeitlich gemittelt
 b) zeitabhängig. Wiederverwendung von Schütz (2013) mit Genehmigung der Springer Nature Customer Service Center GmbH. © Springer Fachmedien Wiesbaden 2013.

Die verbreitetste Form weist sich durch stark geneigte Heckscheibe und einen langen Kofferraum auf. Die Strömung löst sich an der Dachkante ab und legt sich am Kofferraum wieder an. Die abgelöste Strömung legt sich um die Ablöseblase an der Heckscheibe herum und zeitlich gemittelt bildet sie zu den C-Säulenwirbeln ein gegenläufig drehendes Wirbelpaar. In einem zeitabhängigen Verlauf entsteht unter der Ablöseblase ein Haarnadelwirbel, der sich periodisch aus dem Totwasser löst, dadurch die Blase pulsiert. Dieser pulsierende Druck entsteht an einer horizontalen Fläche des Kofferraums und verursacht damit einen oszillierenden Auftrieb an der Hinterachse (vgl. Hucho 2005: 214 und 216). Hinter dem Abschlussblech entstehen im Längsmittelschnitt wieder zwei gegenläufig drehende Wirbel, die auf einen Ringwirbel deuten (vgl. Hucho 2005: 213). Bei einer Form mit einem kurzen Kofferraumdeckel legt sich die an der Dachkante abgelöste Strömung an dem Kofferraumdeckel nicht wieder an. Der obere Teil des Ringwirbels wandert über den Kofferraumdeckel und bildet mit der Ablöseblase an der Heckscheibe ein gegenläufig zirkulierendes System (vgl. Hucho 2005: 216). Hinter beiden Formen bildet sich an den C-Säulen einwärts rotierendes Längswirbelpaar, das schwächer als beim Fließheck ausgeprägt ist und einen kleineren Abwind induziert. Grund dafür ist eine größere Entfernung von dem Abschlussblech, dadurch die Drehbewegung schneller abklingt (vgl. Hucho 2005: 213-216). Die dritte Form zeichnet sich durch eine fast senkrechte Heckscheibe aus. An den C-Säulen entstehen keine Längswirbel, andererseits bildet sich hinter der Heckscheibe ein bogenförmiger Wirbel. Hinter dem Abschlussblech entsteht ebenso ein Ringwirbel (vgl. Hucho 2005: 216).

2.3.5. Grundlagen der Windkanalmessung

Im Windkanal „Göttinger“ Bauart zirkuliert die Luft mittels eines Gebläses in einem geschlossenen Kreislauf. Hauptkomponenten eines Windkanals sind: Düse, Messstrecke, Auffangtrichter und Plenum (vgl. Hucho 2005: 815 und 817).

In der Düse wird die Strömung beschleunigt und die Geschwindigkeit über den Austrittsquerschnitt vergleichmäßigt. Die Gleichmäßigkeit des Geschwindigkeitsprofils geht Hand in Hand mit einem niedrigen Grad der Turbulenz. Die Düse wird durch ihres Kontraktionsverhältnis κ , ihre Kontur und Form ihres Querschnitts bestimmt. Die Länge sollte kurz sein; die Dicke der Grenzschicht steigt proportional zur Länge der Düse. Das Kontraktionsverhältnis $\kappa = A_S/A_N$ ist ein Verhältnis zwischen dem Düseneintritt A_S und dem Düsenaustritt A_N (vgl. Hucho 2005: 817f).

Die Messstrecke wird durch die Querschnittfläche A_N , die von der Düse übernommen wird, und durch die Länge L bezeichnet. Die Versperrung $\varphi = A/A_N$ stellt ein Verhältnis der Projektionsfläche des Fahrzeuges A zur Querschnittfläche A_N dar. Die dimensionslose Länge Λ rechnet sich als $\Lambda = L/D_N$, wo D_N der hydraulische Durchmesser der Düse ist. $\Omega = A_C/A_N$ bezeichnet das Verhältnis der Querschnittflächen zwischen Kollektor und Düse. Als $K = A_P/A_N$ wird das Querschnittsverhältnis vom Plenum A_P zum Strahlquerschnitt A_N definiert (vgl. Hucho 2005: 823). Die Versperrung von $\varphi = 0,1$ sollte nicht überschritten werden. Danach wird die kinematische Ähnlichkeit der freien Strömung nicht mehr gewährleistet, Messkorrekturen werden nötig. Eine unterschiedliche Kinematik der Strömung wird beobachtet, wenn das Fahrzeug durch einen Luftstrahl endliches Querschnitts umgeströmt wird, als wenn sich es in einem unendlich ausgedehnten Raum befindet.

Bei einer offenen Messstrecke im Vergleich zu einem unendlichen Raum weiten sich die Stromlinien in der Nähe des Fahrzeuges auf, die um das Fahrzeug umgeströmte Luft weicht nach außen aus. Durch die Aufweitung werden die Strömungsgeschwindigkeiten in der Nähe des Fahrzeuges kleiner, als wenn das Fahrzeug von einem unendlich ausgedehnten Raum umgeben würde (vgl. Hucho 2005: 824f).

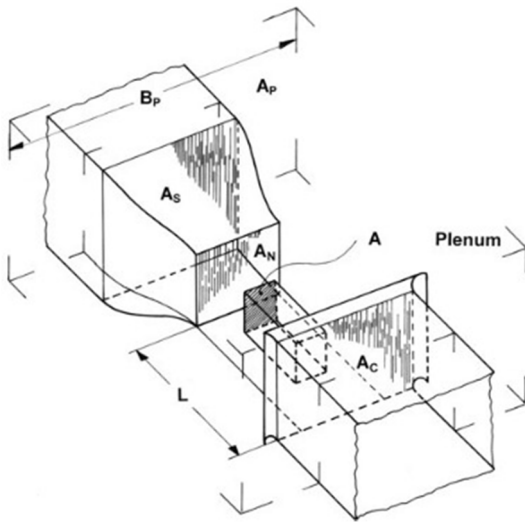


Bild 2.18: Bezeichnung der Bauelemente eines Windkanals. Wiederverwendung von Hucho (2005) mit Genehmigung der Springer Nature Customer Service Center GmbH. © Springer Fachmedien Wiesbaden 2005.

Weiter ist der statische Druck entlang der offenen Messstrecke nicht konstant, jeder Windkanal mit Freistrahlmessstrecke hat seinen spezifischen Druckverlauf. Einflussparameter sind dabei die dimensionslose Länge Λ und das Verhältnis Ω . Der Druckanstieg in der Strömungsrichtung verkleinert den gemessenen Luftwiderstand (vgl. Hucho 2005: 825f).

Im Plenum vermischt sich der Freistrah an seiner Oberfläche mit der ruhenden Luft der Umgebung. Die Höhe, die Breite und die Länge des Plenums muss auf die Messstrecke abgestimmt werden. Bei kleinen Abständen kommt es zu stärkerer Aufweitung des Freistrahls (vgl. Hucho 2005: 827 und 836).

Der Kollektor fängt dann den Freistrah ein. Weil der Freistrah auf dem Weg von der Düse zum Kollektor ein zusätzliches Luftvolumen aufgenommen hat, wird die überschüssige Luft durch einen gerundeten Einlauf des Kollektormundes in das Plenum abgeleitet (vgl. Hucho 2005: 830).

Wenn das Fahrzeug nahe dem Düsenaustritt platziert ist, werden die Stromlinien genauso wie bei der Strahlaufweitung nach außen abgedrängt. Damit wird der Düsenquerschnitt verkleinert und das effektive Versperrungsverhältnis steigt. Diesen Effekt nennt man Strahldeformation. Ein damit verbundener Effekt ist die Düsen-Blockierung. Bei dem Düsenaustritt kann die Strömung nicht Ausweichen wie bei einem Freistrah; die Stromlinien werden zusammengedrückt, es kommt zu einer Erhöhung der Zuströmgeschwindigkeit, was den gemessenen Luftwiderstand erhöht. Ähnlich wirkt auch die Kollektor-Blockierung, wenn das Fahrzeug nahe dem Kollektor positioniert wird. Die Wände des Kollektormundes verursachen, dass die Einstromung zum Kollektor beschleunigt wird; die Geschwindigkeit der Zuströmung wird erhöht (vgl. Hucho 2005: 868f). Die Relativbewegung zwischen Fahrzeug mit rotierenden Rädern und

Straße kann im Windkanal mittels eines Laufbands, auf dem die Räder abrollen, reproduziert werden. Verzichtet man darauf, bildet sich auf dem starren Boden der Messstrecke eine Grenzschicht aus, die die Strömung zwischen dem Auto und dem Boden verändert. An der Fahrbahn gilt die Haftbedingung. Die Dicke der Grenzschicht lässt sich auf die Verdrängungsdicke, die den Luftwiderstand und Auftrieb erhöht, und auf die Impulsverlustdicke, die nur den Widerstand verkleinert, aufteilen. Komponenten des Fahrzeuges die wie Räder in die Grenzschicht eintauchen, weisen einen kleineren Widerstand auf (vgl. Hucho 2005: 845ff).

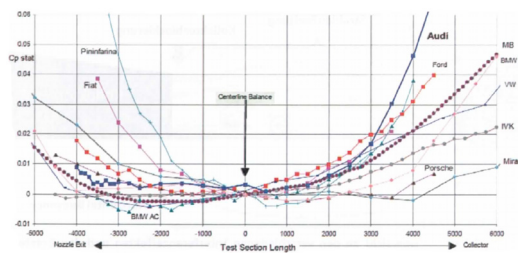


Bild 2.19: Verlauf des statischen Druckes in ausgewählten Windkanälen (Schütz 2012a: 7-154)

Eine vereinfachte Möglichkeit die Fahrbahn zu simulieren (nicht reproduzieren) ist, die Grenzschicht, die sich vor dem Düsenaustritt aufgebaut hat, durch einen Schlitz im Boden abzusaugen. Ziel ist es die Grenzschichtdicke und ihr Wachstum zu vermindern. Die Rotation der Räder wird dabei vernachlässigt. Es hat sich das Verhältnis zwischen Absauggeschwindigkeit u_j und Anströmgeschwindigkeit U_∞ : $u_j/U_\infty = 0,07$ als optimal erwiesen. Das abgesaugte Volumen wird berechnet als: $\dot{Q} = u_j B s$, wo B die Breite der Messstrecke und s die Spaltweite sind. Diese Volumenmenge muss am Ende der Messstrecke dem Strahl wieder zugefügt werden (vgl. Hucho 2005: 855f). Der Nachteil bei dieser Methode ist, dass an Stelle der Absaugung ein Druckgradient entsteht, was den Luftwiderstand am Fahrzeug erhöht. Der Anstellwinkel der Zuströmung ändert sich auch dadurch (vgl. Hucho 2005: 858).

Strömungen um geometrisch ähnliche Körper weisen bei Beibehalten gleichen Reynolds-Zahl ähnliches Verhalten auf. Bei einer gleichen Reynolds-Zahl wird also entweder die Anströmgeschwindigkeit U_∞ , charakteristische Länge l oder die Viskosität μ geändert (vgl. Hucho 2005: 81). Dieses Verhalten stellt eine Grundlage für die Modelltechnik dar. Bei Erhöhung der Anströmgeschwindigkeit U_∞ bei Modellen kleiner als das Original muss geachtet werden, dass die Strömung in Unterschallbereich bleibt. Eine kompressible Strömung mit Überschallgeschwindigkeit erfüllt nicht die Reynoldssche Ähnlichkeit (vgl. Hucho 2005: 81f).

Windkanalmessungen von Nutzfahrzeugen in ihrer Originalgröße zeigen sich als problematisch. Große Fahrzeuge verursachen eine zu große Versperrung der Messstrecke in Quer- und Längsrichtung. Deswegen wird auf Modelle im verkleinerten Maßstab zurückgegriffen. Bei kleinen Maßstäben wird Reynoldssche Ähnlichkeit nicht eingehalten; bei der benötigten Anströmgeschwindigkeit wäre die Strömung kompressibel. Ein guter Kompromiss stellt Modellmaßstab 1:2,5 dar. Bei diesem Maßstab kann die gleiche Reynoldszahl angehalten werden, dabei werden auch originalgetreue Umströmungsverhältnisse erreicht. Die Luftkraftbeiwerte stimmen gut mit den von Großausführung überein (vgl. Hucho 2005: 647ff).

3. Umströmung eines vereinfachten Fahrzeuges (*SingleCar*): Gitterstudie

Bevor das Windkanalmodell untersucht werden konnte, wurde an einem vereinfachten Modell eine Gitterstudie durchgeführt. Das vereinfachte Modell hat einen glatten Unterboden, volle Räder und ist ohne Durchströmung und ohne Fahrwerk ausgeführt. Der Maßstab beträgt ebenso 1:2,5.

Die Randbedingungen im Fall der hier dargestellten Gitterstudie entsprechen den experimentellen operativen Bedingungen (Schrefl, 2008), die auch im Kapitel 4 Umströmung eines realistischen Fahrzeuges (*RealCar*) verwendet werden. Diesbezüglich beträgt die Einlassgeschwindigkeit der Luft $U_\infty = 38,89 \text{ ms}^{-1}$. An der Auslassebene wurde statischer Druck von $p = 100000 \text{ Pa}$ vordefiniert. Hinsichtlich der Geometrie wurden zwei Ausführungen berücksichtigt. Bei der rechteckigen Strömungsdomäne, die als *IO* bezeichnet wird, wurden beide seitlichen Ränder sowie der obere Rand als die Symmetrieebenen angenommen. In dem Windkanalnachbau sind die Wände des Plenums reibungsbehaftet. Der Boden wurde nicht behandelt und mit anwachsender Grenzschicht berechnet. Wegen damals verfügbaren Rechenressourcen wurde die Gitterstudie nur stationär mittels RANS Verfahrens untersucht. Das $k - \varepsilon - \zeta - f$ Turbulenzmodell ist mit der hybriden Wandfunktion gekoppelt. Alle Simulationen wurden mit 50000 Iterationen gerechnet. Die Einstellungen des AVL-FIRE Löser entsprechen denen, die auch im Kapitel 4 Umströmung eines realistischen Fahrzeuges (*RealCar*) verwendet wurden. Die Strömung wird als inkompressibel betrachtet, die Druck-Geschwindigkeits-Kopplung durch die *SIMPLE* Methode gelöst und bei der Diskretisierung die *TVD Schemata MINMOD Relaxed* und *AVL SMART Relaxed* verwendet. Eine detaillierte Beschreibung kann aus dem Anhang A Einstellungen des Löser (*RealCar*) entnommen werden.

3.1. Berechnungsvorbereitung

Das numerische Gitter wird mittels des Werkzeugs *FAME Hexa*, das ein Teil der *AVL AST Software* ist, generiert. Inputs für dieses Programm stellen das Oberflächengitter (*Surface*) und das Kantengitter (*Edges*) dar. Anhand von sogenannten *Selections* lassen sich sowohl auf der Oberfläche als auch auf den Kanten bestimmte Bereiche definieren, die u. a. der Gitterverfeinerung dienen. Bei einer Verfeinerung durch *Selections* muss zusätzlich die Dicke der verfeinerten Schicht definiert werden. Bei *Surface* erstreckt sich die Schicht unterhalb und oberhalb der Fläche, bei *Edges* bildet sich eine kreisförmige Schicht um die Kante. Eine andere räumliche Gitterverfeinerung stellt die Verfeinerung innerhalb eines 3D-Objektes dar. Aus der Natürlichkeit des hexahedralen Gitters wird in diesem Fall ausschließlich auf Boxen zurückgegriffen.

Auf dem Fahrzeug werden *Selections* in strömungsrelevanten Gebieten definiert. Die Stellen der voraussichtlichen Ablösung und Staupunkts werden zielend ausführlich vernetzt. Die Fahrzeugoberfläche ist durch ihre zum Teil kantige Form geprägt. Sie sollte bei der Vernetzung möglichst getreu abgebildet werden. Um eine definierte Ablösung an scharfer Kante zu gewährleisten, wird hier das Kantengitter zu Nutze gemacht. Die Zellenknoten richten sich bei dem Vernetzungsprozess an die Kanten, wodurch vermieden wird, dass die Kanten durch die Zellenflächen deformiert werden, was eine verschmierte Ablösung verursachen könnte und die wirkenden Kräfte negativ beeinflussen würde.

Am Anfang wird eine maximale Zellengröße definiert. Auf diese Größe beziehen sich dann alle Verfeinerungen (*Refinements*).

Bei dünnen Geometrien kann es zu einem Durchbruch kommen. Um es zu vermeiden, werden spezielle *Selections* in dem Abschnitt *Surface Intersection* definiert.

Um eine richtige Ausbildung der turbulenten Grenzschicht zu gewährleisten, werden die ersten Zellen auf der Oberfläche mehrfach mit einer Wachstumsrate geteilt, hier bezeichnet als *Boundary Layers*. Die hier verwendete Einstellung bedeutet, dass die erste Zelle auf drei geteilt wird, wobei die dritte Schicht dreimal so dick als die erste Schicht wird. Weitere Einstellungen des *FAME Hexa* Vernetzers können anhand der Tabelle 3.1 entnommen werden.

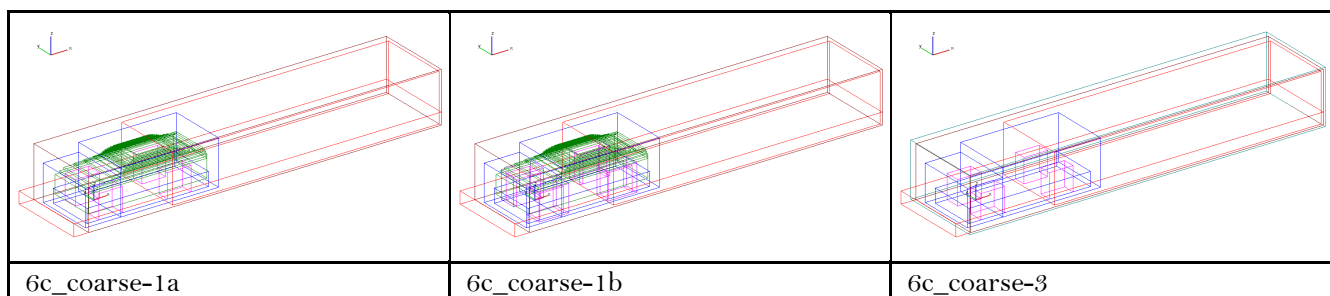
Tabelle 3.1: Einstellungen des *FAME Hexa* Vernetzers bei Gitterstudie für Fall: *Single_Car_mesh-study_8, mio_11a*.

Single_Car_mesh-study_8					
Case mio_9a mio_9a_IO					
General settings	Mesh	6c_coarse-1a_Single_Car.fim 6c_coarse-1a_IO_Single_Car.fim			
	Import surface [m]:	car_surface_small.fim			
	Import edges [m]:	edges_for_car_surface_small_wo_wheels_main.fim			
	Trimming method	Standard			
	Domain recognition	Standard			
	Max cell size [m]	0.05			
	Boundary layer optimization	Volume optimizer			
	Smoothing	Volume optimizer			
	Model details	Preserve model details			
	Refinements	Selection	Refinement level	Cell size [m]	Depth [m]
boden_ref1		4	0.003125	0.010939	
bumper_front_ref1		4	0.003125	0.010939	
bumper_rear_ref1		4	0.003125	0.010939	
dach1_ref1		4	0.003125	0.010939	
grill_ref1		4	0.003125	0.010939	
headlights_ref1		4	0.003125	0.010939	
boden_ref2		5	0.001563	0.004689	
bumper_front_ref2		5	0.001563	0.004689	
bumper_rear_ref2		5	0.001563	0.004689	
dach1_ref2		5	0.001563	0.004689	
grill_ref2		5	0.001563	0.004689	
headlights_ref2		5	0.001563	0.004689	
wheels_on_ground_ref2		5	0.001563	0.004689	
Edge refinements		Selection	Refinement level	Cell size [m]	Depth [m]
	ref2	4	0.003125	0.010939	
ref1	5	0.001563	0.004689		
Box refinements	File Name	Fire Name	Center X Y Z	Sides X Y Z	Refinement level
	Box_wheel_FL_small.prp	Box_0011	0.0 -0.275 0.1	0.4 0.25 0.4	3
	Box_wheel_FR_small.prp	Box_0012	0.0 0.275 0.1	0.4 0.25 0.4	3
	Box_wheel_RR_small.prp	Box_0013	1.154 0.3 0.1	0.4 0.2 0.4	3
	Box_wheel_RL_small.prp	Box_0014	1.154 -0.3 0.1	0.4 0.2 0.4	3
	Box_car_BLT_small_ref.prp	Box_0020	2.3 0.0 0.0	6.2 1.3 0.2	1
	Box_car_wake_small.prp	Box_0019	3.15 0.0 0.3	4.5 1.2 0.8	2
	Box_car_around_1a_small.prp	Box_0017	-0.2 0.0 0.2	0.6 1.0 0.6	2
	Box_car_around_1b_small.prp	Box_0016	0.925 0.0 0.275	1.65 1.0 0.75	2
	Box_car_ground_small.prp	Box_0015	0.625 0.0 0.015	2.05 0.8 0.23	3
	Box_car_around_ref2_small.prp	Box_0021	2.425 0.0 0.325	5.95 1.3 0.85	1
	Box_car_1.prp	Box_0026	0.626 0.0 0.183	2.0 0.79 0.3	3
	Box_car_2.prp	Box_0027	0.663 0.0 0.34975	1.926 0.79 0.0335	3
	Box_car_3.prp	Box_0028	0.7 0.0 0.38325	1.852 0.79 0.0335	3
	Box_car_4.prp	Box_0029	0.774 0.0 0.415	1.704 0.73 0.03	3
	Box_car_5.prp	Box_0030	0.848 0.0 0.445	1.556 0.67 0.03	3
	Box_car_6.prp	Box_0031	0.848 0.0 0.4675	1.26 0.64 0.015	3
	Box_car_7.prp	Box_0032	0.848 0.0 0.4825	1.112 0.61 0.015	3
	Box_car_8.prp	Box_0033	0.8295 0.0 0.4975	1.001 0.595 0.015	3
	Box_car_9.prp	Box_0034	0.82025 0.0 0.5125	0.9455 0.58 0.015	3
Box_car_10.prp	Box_0035	0.811 0.0 0.5275	0.89 0.565 0.015	3	
Box_car_11.prp	Box_0036	0.80175 0.0 0.5425	0.8345 0.55 0.015	3	
Box_car_12.prp	Box_0037	0.80175 0.0 0.55750.7605	0.535 0.015	3	
Box_car_13.prp	Box_0038	0.80175 0.0 0.57250.6865	0.505 0.015	3	
Box_car_14.prp	Box_0039	0.80175 0.0 0.58750.6125	0.475 0.015	3	
Box_car_15.prp	Box_0040	0.80175 0.0 0.60250.4645	0.415 0.015	3	
Boundary layers	Selection	Number of layers	Ratio	Thickness [m]	
	car_ref1	3	3	0.0001	
	Wheels_Front_ref1	3	3	0.0001	
	Wheels_Rear_ref1	3	3	0.0001	

Hier sind typische Einstellungen des *FAME Hexa* dargestellt. Als Beispiel dient der Fall *mio_11a*, alle Fälle der Gitterstudie befinden sich im Anhang. Die Farbfüllungen in der Tabelle stimmen mit den Farben der *Selections* und der Boxen, die später auf den Bildern vorgestellt werden, überein.

Bei dem Gitteraufbau wird darauf geachtet, dass das Gitter immer nur um eine Stufe verfeinert wird. Die größte Box *Box_car_around_ref2_small* wird also mit einem *Refinement Level 1* versehen. Dies sorgt für eine räumliche Verfeinerung innerhalb der Domäne, wobei die Außenwände durch *Max Cell Size* aufgelöst werden. Der Bereich, wo die Strömung dem Fahrzeug ausweichen muss und beschleunigt wird, wird durch Boxen *Box_car_around_1a_small*, *Box_car_around_1b_small* mit *Refinement Level 2* verfeinert. Die Box *Box_car_ground_small* sorgt für Verfeinerung von *Refinement Level 3* im Unterbodenbereich. Das Gitter um die Räder und in den Radhäusern wird durch Boxen *Box_wheel_XX_small* mit einem *Refinement Level 3* verfeinert. Die Strömungseigenschaften an der Fahrzeugoberfläche und in der unmittelbaren Nähe sollten durch 15 kleinen Boxen *Box_car_XX*, die die Fahrzeugoberfläche folgen, erfasst werden. Die Verfeinerung von *Refinement Level 3* wurde gewählt, um an geraden Flächen Zellen zu sparen. Das Totwasser und der Nachlauf werden durch die Box *Box_car_wake_small* mit *Refinement Level 2* verfeinert. Weil der Nachlauf aus der Domäne hinaus läuft, endet die Box teils außerhalb der vernetzten Domäne. Dies

gewährleistet, dass die Verfeinerung auch an der Außenseite vorhanden wird. Das gleiche wird durch die Box *Box_car_BLT_small_ref* für die Grenzschicht erreicht. Damit sich die Grenzschicht vor dem Fahrzeug und die Längswirbel im Nachlauf korrekt ausbilden können, bleibt die Verfeinerung in der y- und z-Richtung durch das ganze Rechengebiet beibehalten. Dies braucht aber weitere Schritte, die später erläutert werden. Eine Übersicht über die Boxverfeinerungen, die bei allen Fällen angewendet wurden, bringt das Bild 3.1.



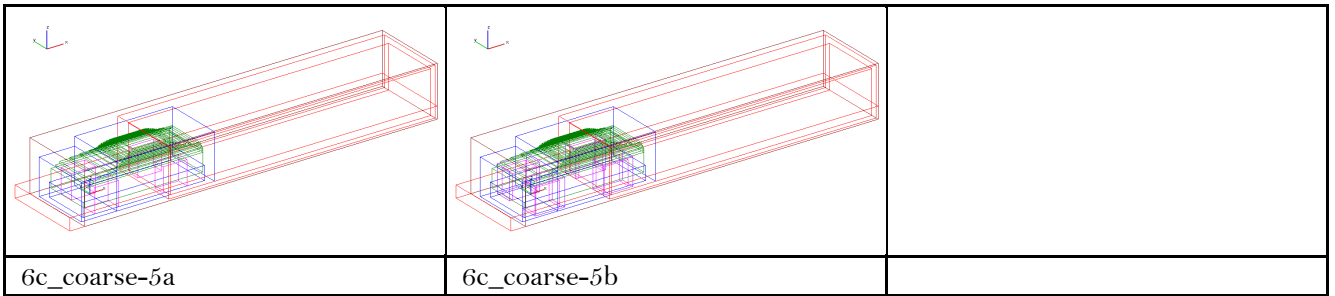


Bild 3.1: Unterschiedliche Anordnung der Boxen bei untersuchten Gittern.

Verfeinerungen größer als 3 werden nur lokal in Ablösungsgebieten, Staupunkten und auf Kanten angewendet. Bild 3.2 und Bild 3.3 zeigen die dazu verwendeten *Selections* an bestimmten Fahrzeugteilen in zwei Verfeinerungsschritten von *Refinement Level 4* (ref1) und *Refinement Level 5* (ref2) geteilt. Auf dem Bild 3.2 werden die *Selections* auf der Oberfläche dargestellt.

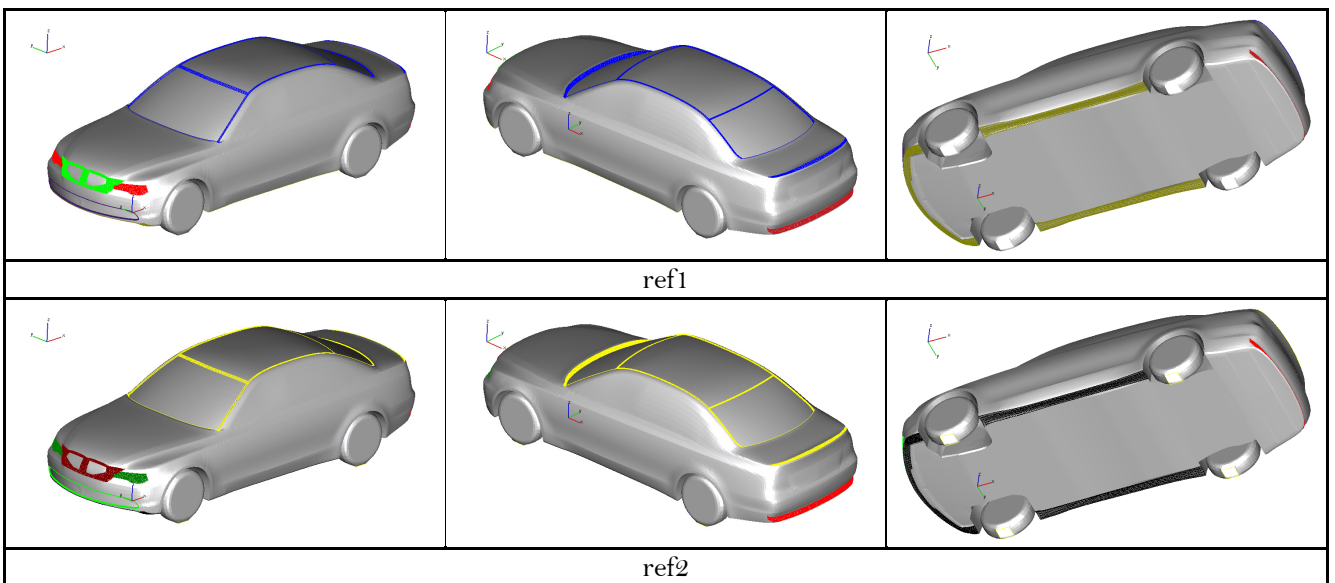


Bild 3.2: *Selections* der Flächenverfeinerung, Stufe ref1 und ref2.

Bild 3.3 zeigt dann die *Selections* des Kantengitters. *Edges* helfen auch der Darstellung von geometrischen Details des Modells. Sie sollten nur dort platziert werden, wo auch tatsächlich auf dem Modell Kanten oder kleine Radien sind.

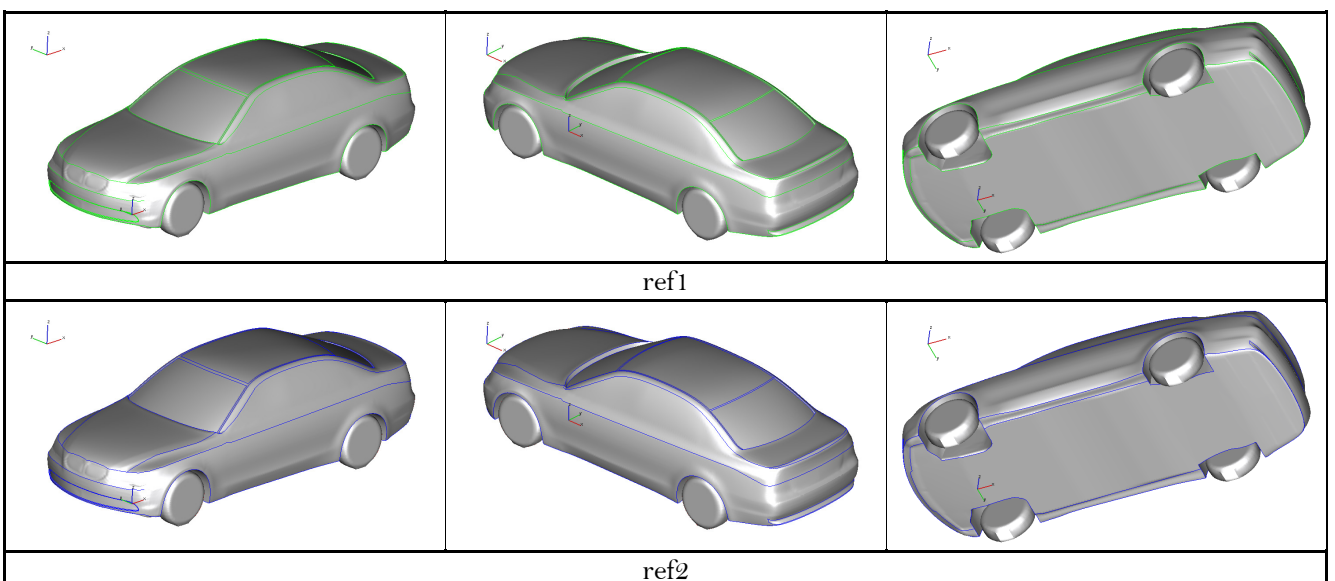


Bild 3.3: *Selections* der Kantenverfeinerung, Stufe ref1 und ref2.

Schließlich werden auf dem Bild 3.4 *Selections* auf der Oberfläche, wo *Boundary Layers* aufgebaut werden, gezeigt. Als Fehler kann hier gesehen werden, dass die Fahrbahn nicht mitgenommen wurde.

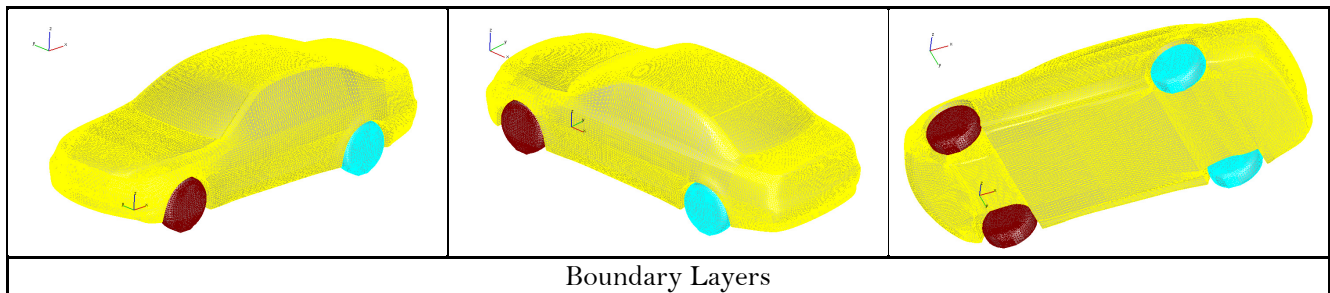


Bild 3.4: Ausgewählte *Selections* für Generierung der *Boundary Layers*.

Bei der Gitterstudie werden folgende Parameter variiert:

- unterschiedliche Verfeinerungsstufen in den Boxen,
- die Dicke der Verfeinerungsschicht von *Surface* und *Edge Selections*,
- Anzahl der Boxen.

Dies fasst die Tabelle 3.2 und das Bild 3.1: Unterschiedliche Anordnung der Boxen bei untersuchten Gittern.

zusammen.

Tabelle 3.2: Gittervarianten mit variierten Verfeinerungsstufen und Dicken.

	Case	Mesh	refinements															
			box around		box wake		box ground		box wheels		box BLT		surface			edges		
			level	cell size	level	cell size	level	cell size	level	cell size	level	cell size	level	cell size	depth	level	cell size	depth
w/o	mio_9	6c_coarse_1	2	0,0125	2	0,0125	2	0,0125	3	0,00625	1	0,025	4	0,00313	0,010939	4	0,00313	0,010939
	mio_9_IO	6c_coarse_1_IO											5	0,00156	0,004689	5	0,00156	0,004689
w ground	mio_9a	6c_coarse_1a											4	0,00313	0,010939	4	0,00313	0,010939
	mio_9a_IO	6c_coarse_1a_IO											5	0,00156	0,004689	5	0,00156	0,004689
	mio_11a	6c_coarse_4a	2	0,0125	2	0,0125	3	0,00625	3	0,00625	1	0,025	4	0,00313	0,023440	4	0,00313	0,023440
	mio_11a_IO	6c_coarse_4a_IO											5	0,00156	0,007815	5	0,00156	0,007815
w ground + wheels	mio_9b	6c_coarse_1b											4	0,00313	0,010939	4	0,00313	0,010939
	mio_9b_IO	6c_coarse_1b_IO											5	0,00156	0,004689	5	0,00156	0,004689
	mio_11b	6c_coarse_4b	2	0,0125	2	0,0125	3	0,00625	4	0,003125	1	0,025	4	0,00313	0,023440	4	0,00313	0,023440
	mio_11b_IO	6c_coarse_4b_IO											5	0,00156	0,007815	5	0,00156	0,007815
	mio_25	6c_coarse_3											4	0,00313	0,010939	4	0,00313	0,010939
	mio_25_IO	6c_coarse_3_IO	3	0,00625	3	0,00625	3	0,00625	4	0,003125	2	0,0125	5	0,00156	0,004689	5	0,00156	0,004689
	mio_20a	6c_coarse_5a											4	0,00313	0,023440	4	0,00313	0,023440
	mio_20a_IO	6c_coarse_5a_IO											5	0,00156	0,007815	5	0,00156	0,007815
	mio_25a	6c_coarse_3a	3	0,00625	3	0,00625	3	0,00625	3	0,00625	2	0,0125	4	0,00313	0,010939	4	0,00313	0,010939
	mio_25a_IO	6c_coarse_3a_IO											5	0,00156	0,004689	5	0,00156	0,004689
	mio_20b	6c_coarse_5b	2	0,0125			3	0,00625			1	0,025	4	0,00313	0,023440	4	0,00313	0,023440
	mio_20b_IO	6c_coarse_5b_IO			3	0,00625			4	0,003125			5	0,00156	0,007815	5	0,00156	0,007815
	mio_25b	6c_coarse_3b	3	0,00625			4	0,003125			2	0,0125	4	0,00313	0,010939	4	0,00313	0,010939
	mio_25b_IO	6c_coarse_3b_IO											5	0,00156	0,004689	5	0,00156	0,004689

Zur Erklärung der Tabelle 3.2 sollte erwähnt werden, dass es zwischen Gittern mit und ohne Bezeichnung *IO* kein Unterschied bei *FAME Hexa* gibt, die Verfeinerungsstufen von *Surface* und *Edges* sind für beide gleich.

Das Ausgangsgitter stellt das Gitter *6c_coarse_1* dar. Schrittweise werden Boxen *box ground* und *box wheels* verfeinert. Jede Kombination wird in zwei Varianten mit unterschiedlicher Verfeinerungsdicke von *Surface* und *Edges Selections* ausgeführt. Bei dem Gitter *6c_coarse_3* werden im Vergleich zum *6c_coarse_1* alle Boxen um eine Stufe feiner. Gitter *6c_coarse_1b*, wo *box wheels* bzw. *6c_coarse_5a*, wo *box wake*, oder *6c_coarse_5b*, wo beide Boxen verfeinert werden, brauchen wegen einem einstufigen Übergang zusätzliche Boxen *Box_wheels_XX_small_fine*, *Box_car_wake_small_fine*, siehe Bild 3.1: Unterschiedliche Anordnung der Boxen bei untersuchten Gittern.

. Bei dem Gitter *6c_coarse_3* werden die Boxen *box around* verfeinert und damit die Boxen *Box_car_XX* nicht mehr benötigt. Eine zusätzliche Box *Box_car_around_ref1_small* um *box around* und *box wake* sorgt wieder für einen einstufigen Übergang.

Als Ergebnis des Vernetzungsprozesses in *FAME Hexa* bekommt man ein Viereck mit Abmessungen $6m \times 0,8m \times 1m$ und einer Auflösung von $0,05m$ an den äußeren Wänden. Eine Ausnahme stellen die

Verfeinerungsgebiete für die Grenzschicht und den Nachlauf dar. Nun wird außen um das *FAME Hexa* Viereck ein zum Teil strukturiertes Gitter aufgebaut. Dies erfolgt mittels die Funktion *Enlarge* in *AVL Fire GUI*.

Jedes *FAME Hexa* Gitter mit gleichen Einstellungen wird durch zwei unterschiedlichen Volumengitter umhüllt und anschließend untersucht. Die Bezeichnung *IO* steht hier für *Inlet-Outlet* und stellt eine rechteckige Domäne dar. Dabei entspricht ihre Höhe und Breite dem Düsenaustritt bei dem BMW Windkanal. Die zweite Ausführung berücksichtigt das Verhalten eines Freistrahls, wie im Abschnitt 2.3.5 beschrieben wurde, und repräsentiert mit ihren Abmessungen das Plenum des BMW Windkanals. Die Ein- und Auslassflächen entsprechen den Flächen von dem Düsenaustritt und dem Kollektor des Windkanals.

Um in die entsprechenden Abmessungen die Zellenknoten zu platzieren, wird das Gitter in jeder Richtung in mehreren Schritten verlängert. Bei der *IO* Variante ist nur ein Schritt in jeder Richtung nötig. Tabelle 3.3 zeigt Abmessungen von einzelnen Bauteilen des Gitters. Anschließend werden die Zellengrößen, die Anzahl der Schichten, die Wachstumsrate und die Richtung der Erweiterung von *FAME Hexa* erwähnt.

Tabelle 3.3: Gitterbauteile mit ihren Abmessungen, Zellgrößen und Schichten.

Single_Car_mesh-study_8-9										
	Dimensions			Cell Size		Rows	Grow Rate	Direction		
	x [m]	y [m]	z [m]	min [m]	max [m]					
FAME Hexa	6	0,8	1							
front	1	4,03	5,77	3,47	0,05	0,1	53,73	54	2	x-
back	1	9,97	5,77	3,47	0,05	0,1	132,9	133	2	x+
right	1	6	2,085	1	0,05	0,1	27,8	28	2	y+
left	1	6	2,085	1	0,05	0,1	27,8	28	2	y-
up	1	6	5,77	2,47	0,05	0,1	32,93	33	2	z+
mesh		20	5,77	3,47						
front	1	4,03	0,8	1	0,05	0,1	53,73	54	2	x-
back	1	1,13	0,8	1	0,05	0,1	15,07	15	2	x+
	1	11,16	2,085	1	0,05	0,16	19,86	20	3,2	y+
right	2	11,16	0,16	1	0,16	0,16	1	1	1	y+
	3	11,16	2,13	1	0,16	0,24	10,65	11	1,5	y+
left	1	11,16	2,085	1	0,05	0,16	19,86	20	3,2	y-
	2	11,16	0,16	1	0,16	0,16	1	1	1	y-
	3	11,16	2,13	1	0,16	0,24	10,65	11	1,5	y-
up	1	11,16	10,35	2,47	0,05	0,12	29,06	29	2,4	z+
	2	11,16	10,35	0,43	0,12	0,14	3,308	3	1,167	z+
	3	11,16	10,35	5,1	0,14	0,238	26,98	27	1,7	z+
mesh		11,16	10,35	9						

Diese oben genannten Parameter hängen von einander wie folgt ab:

$$Rows = \frac{Dimension\{in\ Direction\}}{\frac{1}{2}(max\ Cell\ Size + min\ Cell\ Size)} \quad (3.1)$$

$$Grow\ Rate = \frac{max\ Cell\ Size}{min\ Cell\ Size} \quad (3.2)$$

Diese zwei Parameter werden in *AVL Fire GUI* in der Funktion *Refine* → *Redimension* verwendet und als *Number of distributions* und *Compression Factor* bezeichnet.

Bei so entstehenden Gittern müssen noch die Einzelteile durch die Funktionen *Connect/Split* → *Join Meshes*, *Conform connect* zusammen geklebt werden.

Tabelle 3.4 zeigt die Anzahl von Zellen der fertigen Gitter. Bezeichnungen der *Cases mio_XX* bzw. *mio_XX_IO* sollten zumindest bei den Ausgangsgittern *mio_9*, *mio_11a*, *mio_20a* und *mio_25* der Zellenanzahl entsprechen. Die Bezeichnung *long* steht für eine Erweiterung der Domäne um ein Kollektor. Abkürzung *BL* steht für *Boundary Layers*, die dann an den Kollektorwänden zugefügt wurden.

Tabelle 3.4: Liste der generierten Gitter mit ihrer Zellenanzahl.

Project	Case	Mesh	No. of cells
Single_Car_mesh-study_8	mio_9	6c_coarse-1_Single_Car.flm	8834097
	mio_9_IO	6c_coarse-1_IO_Single_Car.flm	9281213
	mio_9a	6c_coarse-1a_Single_Car.flm	9064039
	mio_9a_IO	6c_coarse-1a_IO_Single_Car.flm	9511155
	mio_11a	6c_coarse-4a_Single_Car.flm	11206613
	mio_11a_long	6c_coarse-4a_Single_Car_long.flm	11831511
	mio_11a_long_BL	6c_coarse-4a_Single_Car_long.BL.flm	12547527
	mio_11a_IO	6c_coarse-4a_IO_Single_Car.flm	11653729
	mio_9b	6c_coarse-1b_Single_Car.flm	11339480
	mio_9b_IO	6c_coarse-1b_IO_Single_Car.flm	11786596
	mio_11b	6c_coarse-4b_Single_Car.flm	13270261
	mio_11b_IO	6c_coarse-4b_IO_Single_Car.flm	13717377
Single_Car_mesh-study_9	mio_25	6c_coarse-3_Single_Car.flm	24222330
	mio_25_IO	6c_coarse-3_IO_Single_Car.flm	26720802
	mio_20a	6c_coarse-5a_Single_Car.flm	20536917
	mio_20a_IO	6c_coarse-5a_IO_Single_Car.flm	22283783
	mio_25a	6c_coarse-3a_Single_Car.flm	26356694
	mio_25a_IO	6c_coarse-3a_IO_Single_Car.flm	28855166
	mio_20b	6c_coarse-5b_Single_Car.flm	22543536
	mio_20b_IO	6c_coarse-5b_IO_Single_Car.flm	24427462
	mio_25b	6c_coarse-3b_Single_Car.flm	30222809
	mio_25b_IO	6c_coarse-3b_IO_Single_Car.flm	32721281

3.2. Ergebnisauswertung und Diskussion

Der wichtigste Parameter in dieser Gitterstudie ist der Luftwiderstand c_d . In CFD wird der Wert im Vergleich zum Experiment meistens unterschätzt. Ziel dieser Gitterstudie ist eine Gitterkonfiguration mit dem höchsten c_d bei je möglich geringer Anzahl von Gitterzellen. In RANS Simulationen wird der Auftrieb c_l fast immer deutlich überschätzt. Es ist aber unerwünscht, diesen Wert durch die Gitterkonfiguration künstlich zu senken. Das Gitter muss sowohl in der IO- als auch in der Windkanalvariante gleich gut performen.

Tabelle 3.5: Gitterstudie - Luftwiderstandsbeiwerte von Karosserie mit und ohne Räder.

Case	Solver	car_n_wheels:cD:-	car_n_wheels:cS:-	car_n_wheels:cL:-	car_2:car_cD:-	car_2:car_cS:-	car_2:car_cL:-
mio_9	RANS	0,1831	0,00328	-4,9860	0,0280	0,22857	0,0035
mio_9_IO	RANS	0,2333	0,00632	-4,9893	0,1873	0,00597	0,0266
mio_9a	RANS	0,2287	0,00136	-4,9831	0,1837	0,00129	0,0325
mio_9a_IO	RANS	0,2323	0,00140	-4,9881	0,1869	0,00126	0,0300
mio_9b	RANS	0,2281	-0,00413	-4,9742	0,1837	-0,00260	0,0473
mio_9b_IO	RANS	0,2338	0,00618	-4,9767	0,1883	0,00761	0,0458
mio_11a	RANS	0,2347	0,00072	-4,9625	0,1883	0,00065	0,0571
mio_11a_long	RANS	0,2346	0,00208	-4,9645	0,1879	0,00207	0,0550
mio_11a_long_BL	RANS	0,2376	-0,00021	-4,9596	0,1907	-0,00033	0,0559
mio_11a_IO	RANS	0,2405	0,00049	-4,9660	0,1932	0,00016	0,0550
mio_11b	RANS	0,2325	-0,00513	-4,9834	0,1861	-0,00432	0,0378
mio_11b_OI	RANS	0,2375	-0,00270	-4,9891	0,1906	-0,00173	0,0336
mio_25	RANS	0,2177	0,00136	-4,9953	0,1705	0,00172	0,0255
mio_25_IO	RANS	0,2338	0,00202	-4,9976	0,1856	0,00203	0,0241
mio_25a	RANS	0,2311	-0,00258	-5,0140	0,1845	-0,00159	0,0058
mio_25a_IO	RANS	0,2353	-0,00546	-5,0080	0,1884	-0,00461	0,0135
mio_25b	RANS	0,1846	0,01529	-4,9451	0,1427	0,01625	0,0743
mio_25b_IO	RANS						
mio_20a	RANS	0,2352	0,00197	-4,9617	0,1889	0,00186	0,0551
mio_20a_IO	RANS						
mio_20b	RANS	0,2319	-0,00043	-4,9960	0,1866	0,00095	0,0234
mio_20b_IO	RANS						

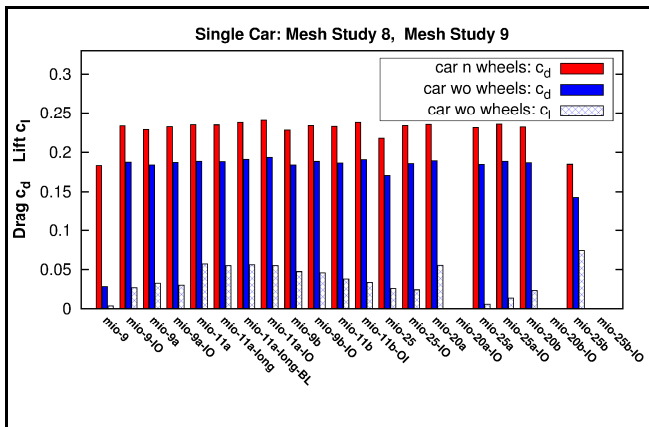
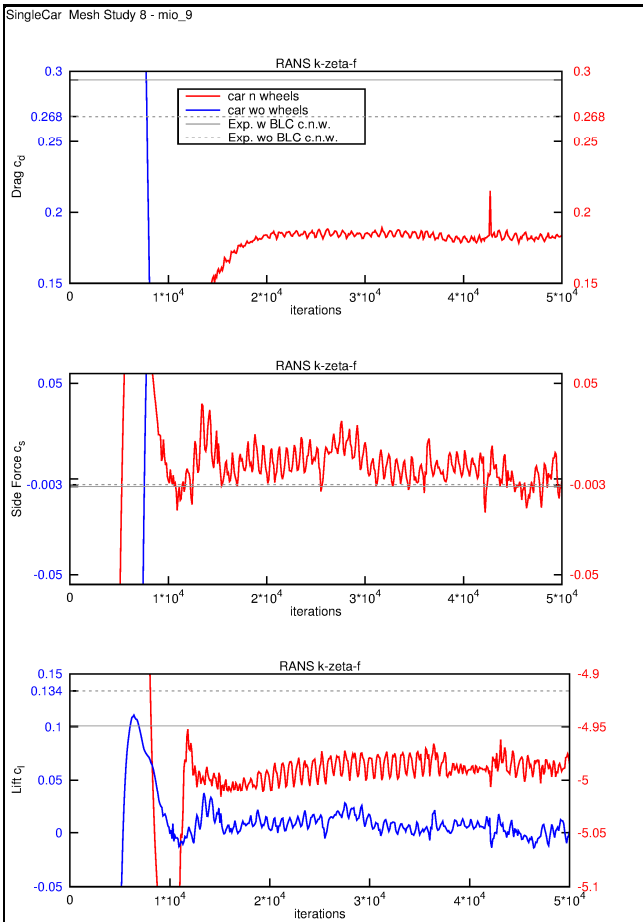
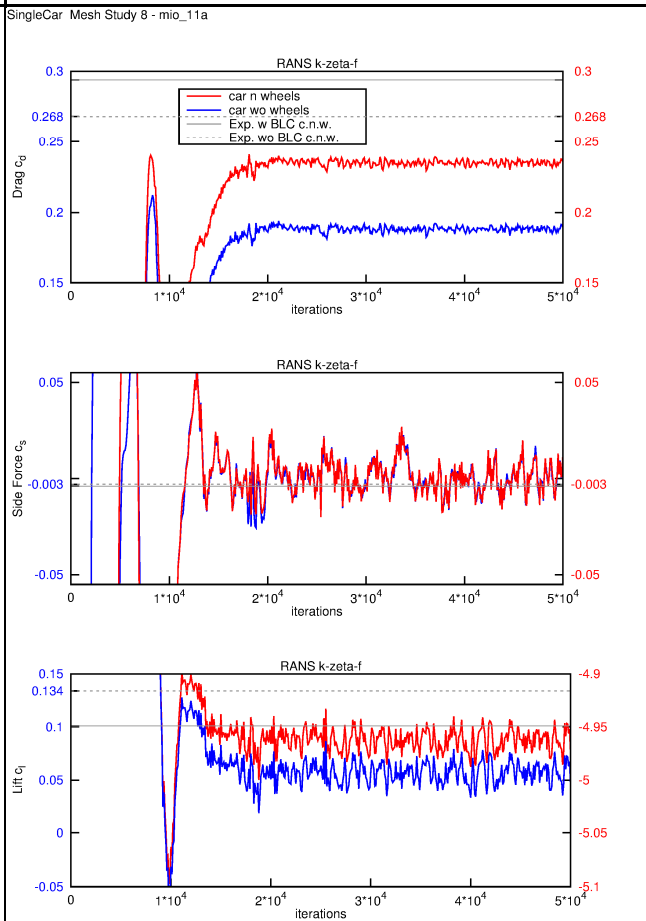
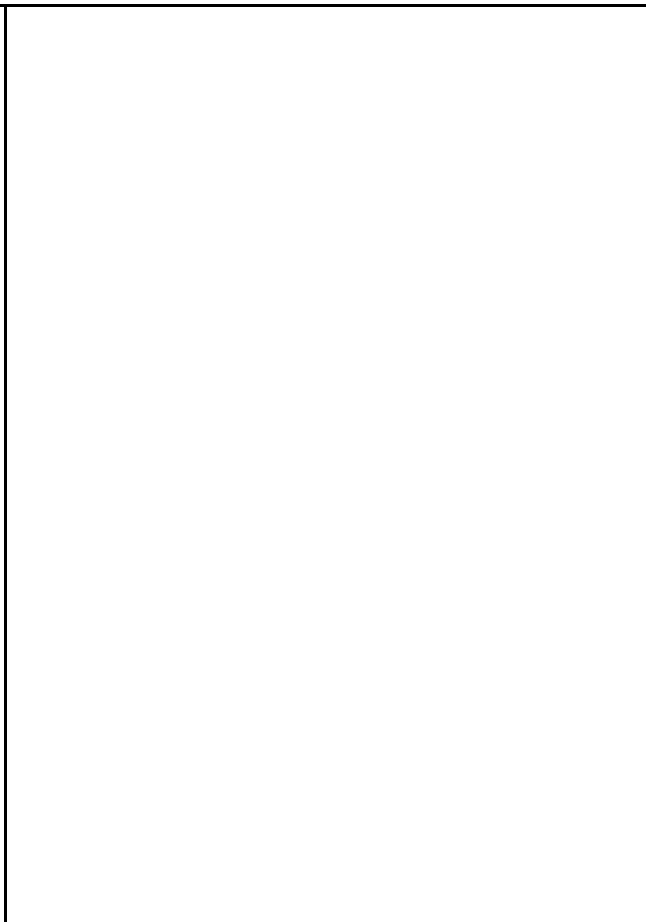
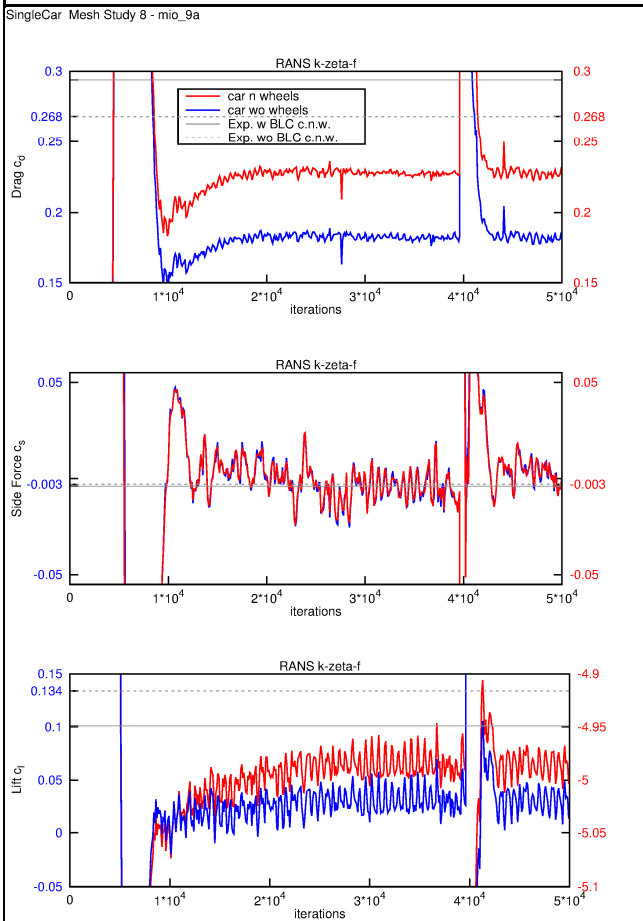


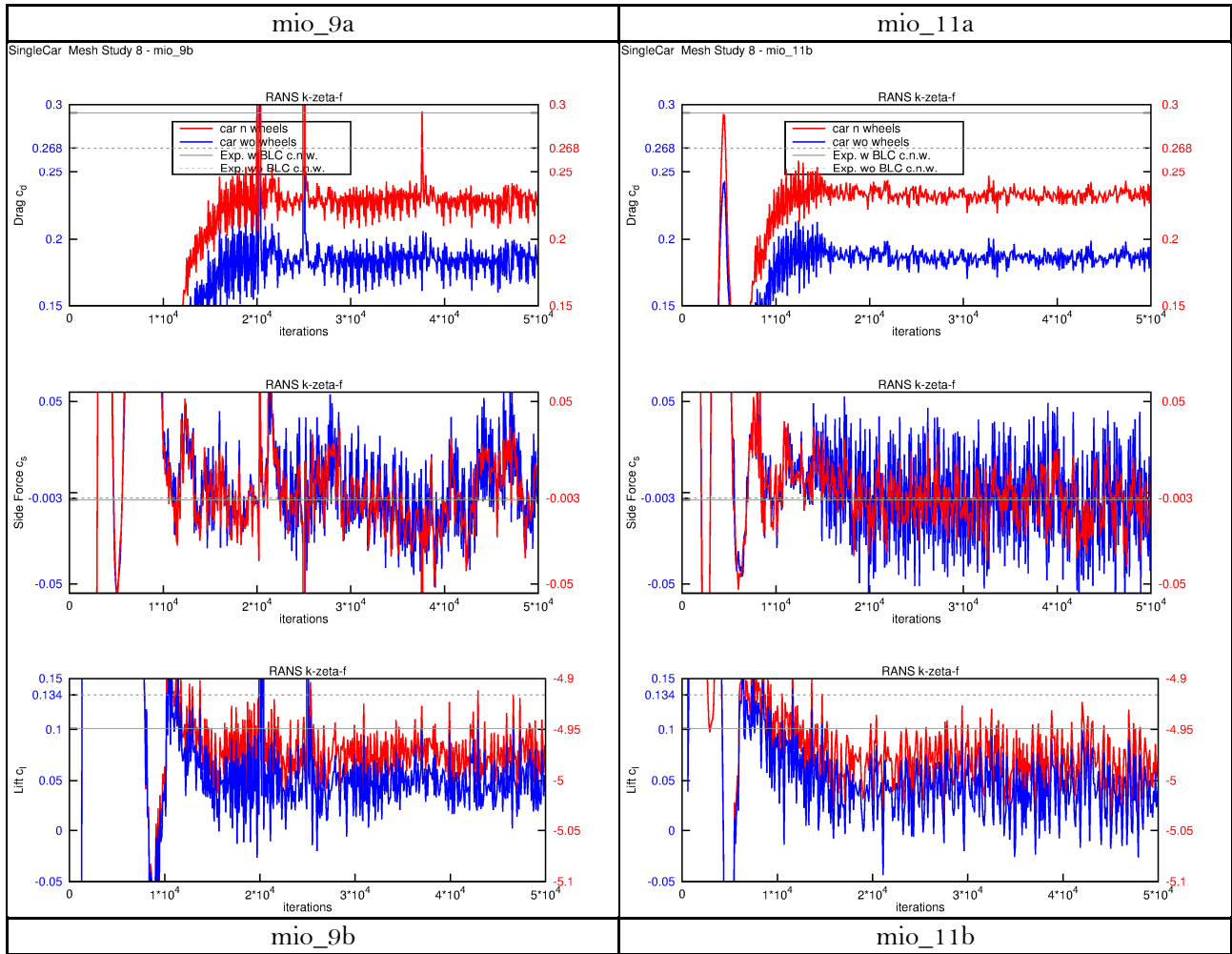
Bild 3.5: Histogramm des Luftwiderstands c_d und Auftriebs c_l des Fahrzeuges mit und ohne Räder von Fällen der Gitterstudie.

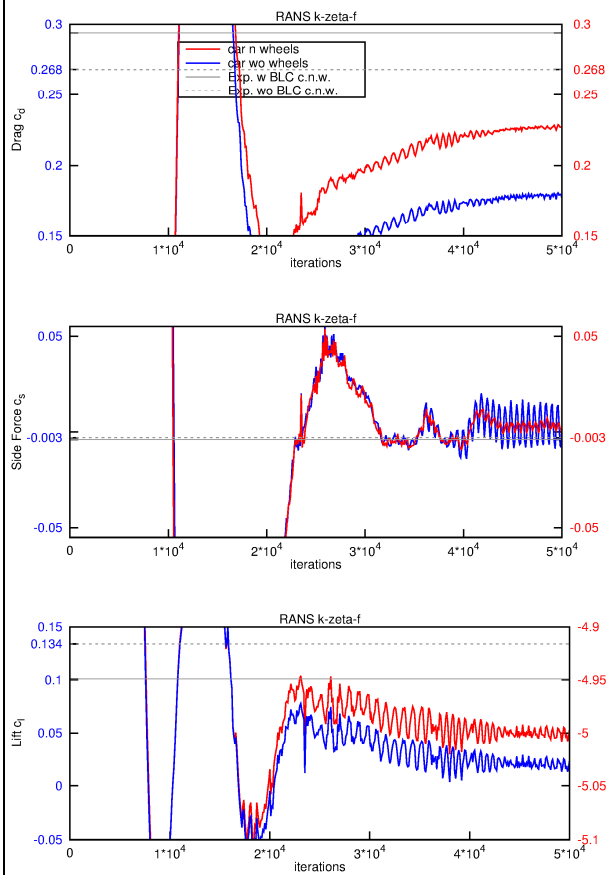
Anhand der Tabelle 3.5 und dem Bild 3.5 zeigt sich, dass die Gitter *mio_9* und *mio_9_IO* unterschiedliche c_d -Werte liefern. Der einzige Unterschied des Gitters *mio_9* zum Gitter *mio_9a* ist die Verfeinerungsstufe der Box *Box_car_ground_small*. Hier zeigt sich, dass die Fahrzeugumgebung mit gleicher Gitterfeinheit sowohl auf der Ober- als auch auf der Unterseite vernetzt werden sollte. Eine weitere Verfeinerung in den Radhäusern und um die Räder durch die Boxen *Box_wheel_XX_small*, die mit dem Gitter *mio_9b* getestet wurde, bringt keine Erhöhung des Luftwiderstandes c_d sondern führt nur zu verstärkten Oszillationen der Luftwiderstände (siehe Bild 3.6). Den Unterschied zwischen Gitter *mio_9a* und *mio_11a* bzw. *mio_9b* und *mio_11b* stellt die Dicke der Verfeinerungsschicht von *Surface* und *Edge Selections* dar. Sie wurde bei dem *Refinement Level 4* von $0,010939m$ auf $0,023440m$ und bei dem *Refinement Level 5* von $0,004689m$ auf $0,007815m$ vergrößert. Diese Verfeinerung erhöht die Zellenanzahl um etwa zwei Millionen Zellen (siehe Tabelle 3.4). Gitter mit der größeren Dicke der Verfeinerungsschicht also Gitter *mio_11x* weisen sowohl einen größeren Luftwiderstand c_d als auch einen größeren Auftrieb c_l im Vergleich zu Gittern *mio_9x* auf. Ablösungen an den Kanten, die zum Teil für den Luftwiderstand des Fahrzeuges verantwortlich sind, werden durch diese Maßnahme besser abgebildet. Diese Zellenerhöhung wird also in Kauf genommen. Das Gitter *mio_20a* geht aus dem Gitter *mio_11a* hervor. Dabei wurde die Box *Box_car_wake_small* mit dem höheren *Refinement Level 3* versehen. Tabelle 3.5 zufolge hat diese Maßnahme keine deutliche Auswirkung auf die Luftwiderstände. Für die Box *Box_car_wake_small* ist also *Refinement Level 2* ausreichend. Beim Gitter *mio_20b* wurde ebenso wie bei den Gittern *mio_9b* und *mio_11b* die Verfeinerung um die Räder durch die Boxen *Box_wheel_XX_small* untersucht. Weil die Gitter *mio_20x* im Vergleich zu den Gittern *mio_11x* keine Verbesserung darstellen, wurden die *IO Cases* nicht mehr gerechnet. Bei den Gittern *mio_25x* wurde die Verfeinerung von den Boxen *Box_car_around_1a_small*, und *Box_car_around_1b_small* auf *Refinement Level 3* und von der Box *Box_car_BLT_small_ref* auf *Refinement Level 2* untersucht. Dadurch entfallen die Boxen *Box_car_XX*; ein größerer verfeinerter Bereich umhüllt das Fahrzeug. In dem Grenzschichtbereich wurde ebenso verfeinert. Durch die oben genannten Maßnahmen bleibt der Luftwiderstand c_d auf dem gleichen Niveau wie bei den Gittern *mio_11x*. Bei dem Gitter *mio_25* wurden wieder die Boxen *Box_wheel_XX_small* auf das *Refinement Level 4* verfeinert. Wie alle Ergebnisse zeigen, weisen Gitter mit einem *Refinement Level 4* in den Radläufen und um die Räder eine Abnahme des Auftriebes c_l auf. Bei dem Gitter *mio_25b* wurde zusätzlich der Unterbodenbereich durch die Box *Box_car_ground_small* auf das *Refinement Level 4* verfeinert. Die künstliche Abnahme des Luftwiderstandes c_d und die Zunahme des Auftriebes c_l weist auf eine unterschiedliche Gitterfeinheit auf der Ober- und Unterseite des Fahrzeuges hin. Es hat sich erwiesen, dass unter dem Fahrzeug weder ein gröberes noch ein feineres Gitter als über und um das Fahrzeug herum nicht empfohlen ist. Weil die Gitter *mio_25x* von 25 bis zu 30 Millionen Zellen haben, wurden durch die schmalere Verfeinerungsschicht von *Surface* und *Edge Selections* von $0,010939m$ bzw. $0,004689m$ Zellen gespart. Dies hat sich zusammen mit den Ergebnissen von den Gittern *mio_9x* als kontraproduktiv mit einem negativen Einfluss auf den Auftrieb c_l erwiesen.



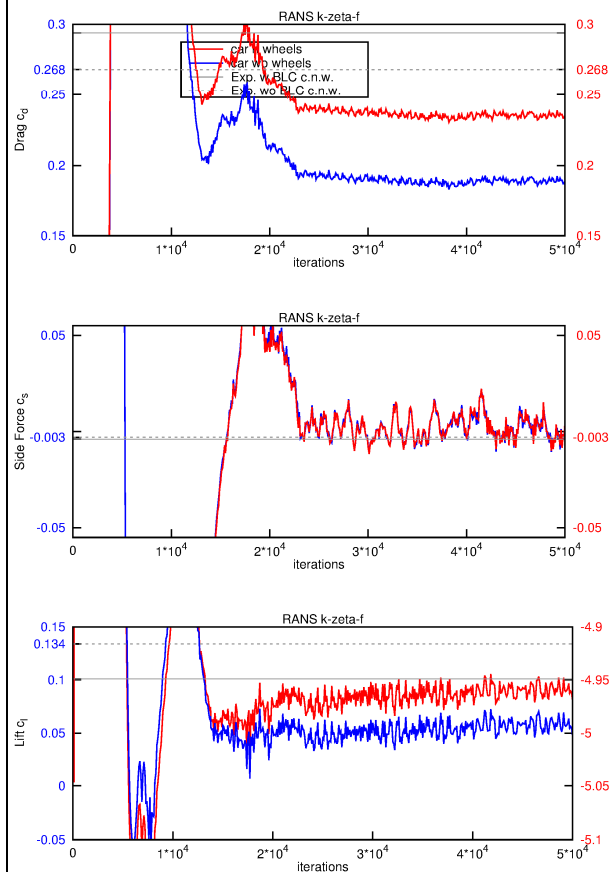
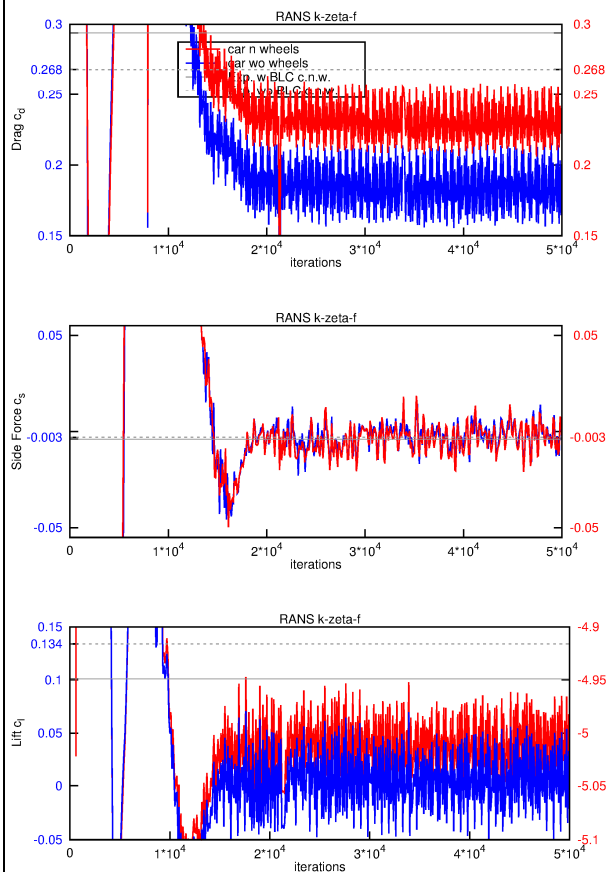
mio_9







mio_25



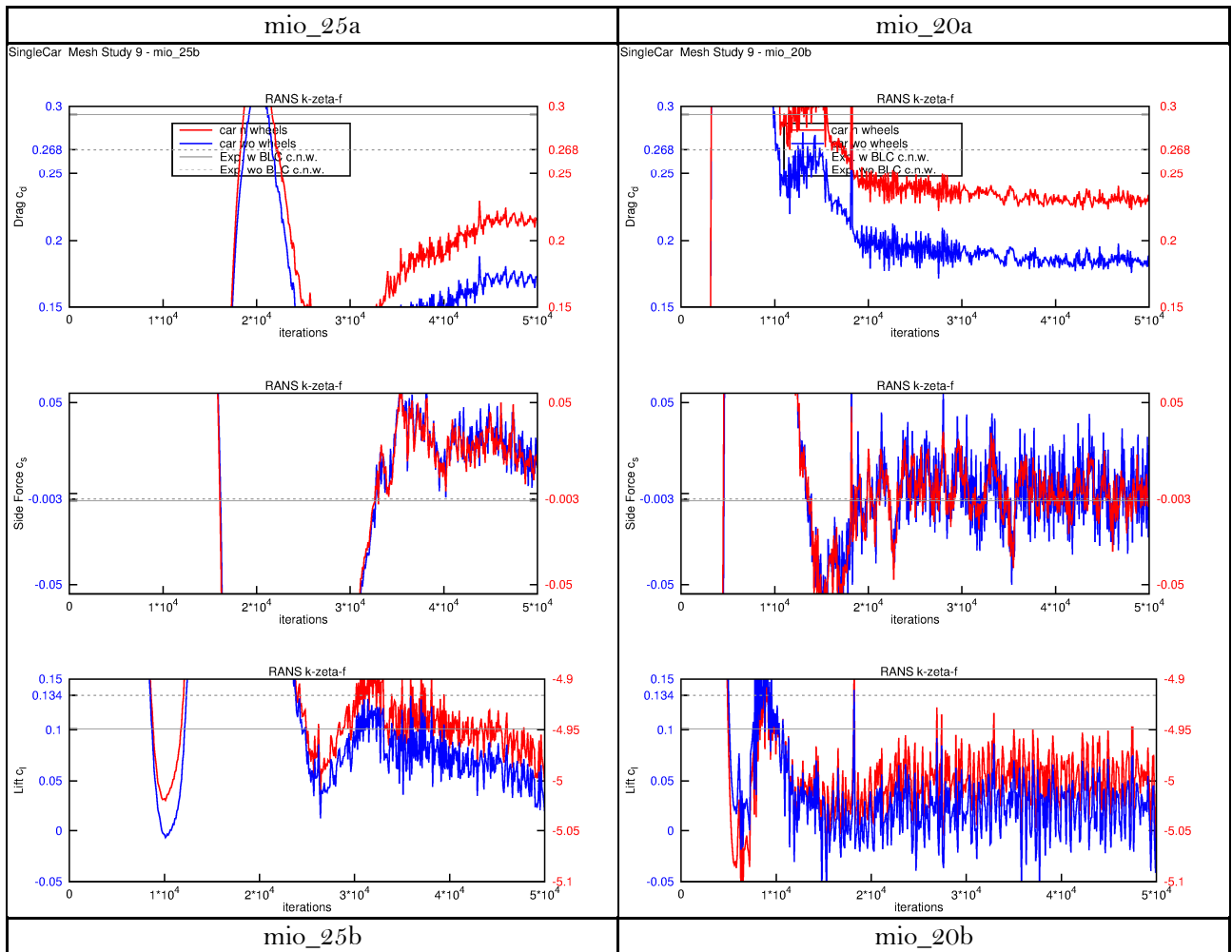


Bild 3.6: Verläufe des Luftwiderstands c_d , der Seitenkraft c_s des Auftriebs c_l aus Fällen der Gitterstudie.

Der Graf auf dem Bild 3.5 zeigt ein sehr interessantes Verhalten. Der Unterschied zwischen dem Luftwiderstand c_d auf der Oberfläche *car n wheels* (Karosserie mit Rädern) und auf der Oberfläche *car wo wheels* (Karosserie ohne Räder) bleibt bei fast allen Simulationen gleich. Das bedeutet, dass die Umströmung der Räder auf die Gitterfeinheit weniger empfindlich ist. In Tabelle 3.5 sind bei dem Auftrieb der Oberfläche *car n wheels* unrealistische Werte zu sehen. Dieses Problem entsteht in AVL Fire immer dort, wo die Oberfläche nicht geschlossen bleibt. Wenn das der Fall ist, werden die Kräfte auf der Oberfläche senkrecht in Richtung der Öffnung durch das Programm auch auf der Flächeninnenseite berechnet. Das hat zur Folge, dass, bei durch den Boden aufgeschnittenen Rädern, der Auftrieb der Räder falsch berechnet wird. Dieses Problem wird in dieser Arbeit weiter untersucht und umgegangen.

4. Umströmung eines realistischen Fahrzeuges (*RealCar*)

Als *RealCar* wird in diesem Abschnitt eine Äquivalenz zu dem Windkanalmodell bezeichnet. Es handelt sich um ein leicht vereinfachtes Modell des BMW 5er-Reihe E60 mit vielen Details. Der Modellmaßstab 1:2,5 wurde beibehalten. Das Modell beinhaltet Querlenker, Spurstangen und Stabilisator in den vorderen Radhäusern. Hinten befindet sich eine komplette Hinterachse mit Differential und Antriebswellen. Die Bremsen sind nur durch Bremsscheiben dargestellt. Das Rad besteht aus einer Alufelge und einem Reifen ohne Profil. Vor allen vier Rädern befinden sich Staulippen. Die Auspuffanlage besteht aus Mittel- und Endschalldämpfer und geht durch Tunnel bis zum Heck. Der Tunnel ist durch eine Tunnelbrücke überbrückt. Der Motorraum ist abgedeckt. Mit Motor, Kardanwelle, Stoßdämpfern mit Federn, Bremsattel ist das Modell nicht ausgestattet. Die Karosserie beinhaltet Außenspiegel. Die typischen BMW Nieren und der Grill in der Frontschürze sind zu, es findet keine Durchströmung statt.

Die Randbedingungen entsprechen exakt den im Experiment adoptierten Bedingungen. Die beziehen sich vor allem auf die Anströmgeschwindigkeit von $U_\infty = 38,89 \text{ ms}^{-1}$. An der Auslassebene wurde zuerst der statische Druck $p = 100000 \text{ Pa}$ definiert. Im Laufe der Berechnungen hat sich aber der Nullgradient aller Variablen als mehr geeignet erwiesen. An beiden seitlichen Rändern sowie am oberen Rand der Hexaeder-ähnlichen *IO*-Domäne wurden die Symmetriebedingungen verwendet. Bei den die Grenzschichtabsaugung (*Boundary Layer Control – BLC*) berücksichtigenden Strömungsfällen wurde eine weitere Einlassebene auf dem Boden nach dem Düsen Eintritt hinzugefügt. Die Luft wird senkrecht zur Ebene mit einer Geschwindigkeit von $u = -2,7 \text{ ms}^{-1}$ abgesaugt. Der gleiche Volumenstrom wurde der Strömung später im Kollektor unter einem 45° Winkel zurückgeführt. Bei unterschiedlichem Flächenverhältnis beträgt die Geschwindigkeit $u_x = 2 \text{ ms}^{-1}$ und $u_z = 2 \text{ ms}^{-1}$. Eine Ausnahme stellen die Fälle *Wheels_IO-BLC*- dar. Bei denen wurde die Grenzschichtabsaugung *BLC* mittels eines reibungsfreien Bodens simuliert.

Die gesamte Simulationszeit von $t = 10,3 \text{ s}$ wird mit einem Zeitschritt von $\Delta t = 0,001 \text{ s}$ im Fall der beiden instationären Simulationen - URANS und PANS - aufgelöst. Die am Anfang der Berechnungsstudie eingesetzten RANS Berechnungen wurden innerhalb von 50000 Iterationen durchgeführt. Die Iterationsanzahl innerhalb eines Zeitschrittes beträgt 10 bei URANS Simulation und 15 bei der Anwendung der PANS Methode.

Das $k - \varepsilon - \zeta - f$ Turbulenzmodell wird in der Wandnähe von der hybriden Wandfunktion unterstützt. Das fluid ist ein inkompressibles ideales Gas. Die Druckkorrelation erfolgt durch die *SIMPLE* Methode. Die hier verwendeten Schemata für die Diskretisierung des konvektiven Flusses: *MINMOD Relaxed* und *AVL SMART Relaxed* sind *TVD* Schemata Genauigkeit zweiter Ordnung.

Die Einstellungen des AVL-FIRE Löser, entsprechend der *AVL-FIRE* Benutzeroberfläche (*GUI – Graphic User Interface*), können in aller Ausführlichkeit dem Anhang A Einstellungen des Löser (*RealCar*) entnommen werden.

4.1. Berechnungsvorbereitung

Für die Gittergenerierung wird wieder das Werkzeug *FAME Hexa* verwendet. Auf dem Oberflächengitter (*Surface*) werden *Selections* nicht nur in den strömungsrelevanten Gebieten definiert, sondern auch an den Stellen wo die Konturen der Geometrie angehalten werden sollten. Diese Stellen sind zum Beispiel Verrundungen, Radien und schmale Flächen, wo eine Durchdringung der Zellen droht. Durch die *Selections* auf dem Kantengitter (*Edges*) werden zielend die Kanten an der Geometrie angehalten. Die *Edges* sind manuell nur dort definiert, wo sich tatsächlich eine Kante, oder ein Übergang zu einer Krümmung befindet. An Stellen der *Edges* werden bei der Gittergenerierung die Zellenknoten platziert. Kanten auf geraden Flächen oder zu nah einander liegende Kanten wirken kontraproduktiv und können das Gitter unerwünscht deformieren.

Bei den *Surface Selections* wird eine Schicht mit vordefinierter Dicke unterhalb und oberhalb der Fläche verfeinert. Bei den *Edge Selections* wird dann eine kreisförmige Schicht vordefinierte Dicke um die Kante herum verfeinert. Die dritte Gitterverfeinerungsmöglichkeit stellen die 3D-Objekte dar. Dabei wird das Gitter nur innerhalb des 3D-Objektes verfeinert.

Tabelle 4.1: Einstellungen des *FAME Hexa* Vernetzers beim *RealCar_Calculation4*.

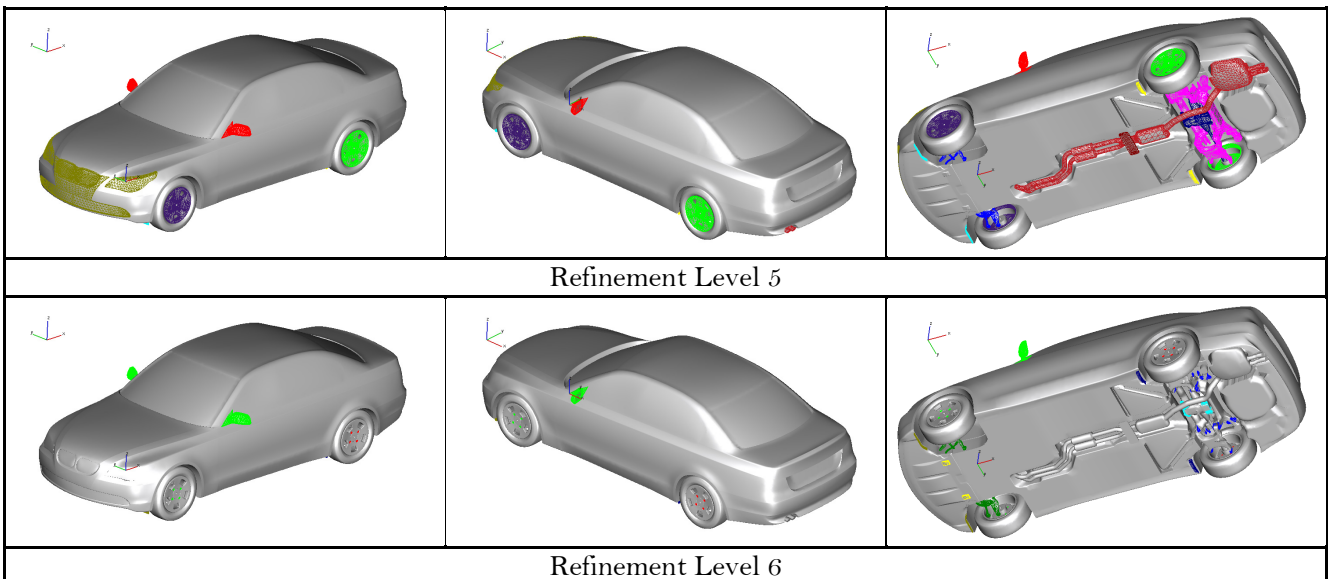
		RealCar_Calculation4			
		All Cases			
General settings	Case	test3-3-G-7i-8b_RealCar.flm test3-3-G-7i-8b_IO_RealCar.flm			
	Mesh	Surface_1_wheels_RealCar_Graz-3.flm			
	Import surface [m]:	edges_1_wheels_RealCar_Graz-2.flm			
	Import edges [m]:	Standard			
	Trimming method	Standard			
	Domain recognition	Standard			
	Max cell size [m]	0.05			
	User specified octree center:	x [m]	y [m]	z [m]	
		2.3001956	0	0.3570000008	
	Boundary layer optimization	Volume optimizer			
Smoothing	Volume optimizer				
Model details	Preserve model details				
Refinements	Selection	Refinement level	Cell size [m]	Depth [m]	
	abgasanlage_ref1	5	0.001563	0.007815	
	antrieb_hinten_ref1	5	0.001563	0.007815	
	aussenspiegel_ref1	5	0.001563	0.007815	
	fahnrwekr_vom_ref1	5	0.001563	0.007815	
	felgen_hinten_ref1	5	0.001563	0.007815	
	felgen_vom_ref1	5	0.001563	0.007815	
	hinterachse_ref1	5	0.001563	0.007815	
	nase_ref1	5	0.001563	0.007815	
	staulippen_hinten_ref1	5	0.001563	0.007815	
	staulippen_vom_ref1	5	0.001563	0.007815	
	tunnelbruecke_ref1	5	0.001563	0.007815	
	antrieb_hinten_ref2	6	0.000781	0.001563	
	aussenspiegel_ref2	6	0.000781	0.001563	
	fahnrwekr_vom_ref2	6	0.000781	0.001563	
	felgen_hinten_ref2	6	0.000781	0.000781	
	felgen_vom_ref2	6	0.000781	0.000781	
	hinterachse_ref2	6	0.000781	0.001172	
	staulippen_hinten_ref2	6	0.000781	0.001563	
	staulippen_vom_ref2	6	0.000781	0.001563	
	unterboden_ref2	6	0.000781	0.001563	
	antrieb_hinten_ref3	7	0.000391	0.000781	
	aussenspiegel_ref3x	7	0.000391	0.000781	
	hinterachse_ref3	7	0.000391	0.000391	
	staulippen_hinten_ref3i	7	0.000391	0.000391	
Edge refinements	Selection	Refinement level	Cell size [m]	Depth [m]	
	edges_abgasanlage_ref1	4	0.003125	0.023440	
	edges_antrieb_hinten_ref1	4	0.003125	0.023440	
	edges_aussenspiegel_ref1	4	0.003125	0.023440	
	edges_fahnrwekr_vom_ref1	4	0.003125	0.023440	
	edges_hinterachse_ref1	4	0.003125	0.023440	
	edges_karosserie_ref1	4	0.003125	0.023440	
	edges_raeder_hinten_ref1	4	0.003125	0.023440	
	edges_raeder_vom_ref1	4	0.003125	0.023440	
	edges_staulippen_hinten_ref1	4	0.003125	0.023440	
	edges_staulippen_vom_ref1	4	0.003125	0.023440	
	edges_tunnelbruecke_ref1	4	0.003125	0.023440	
	edges_unterboden_ref1	4	0.003125	0.023440	
	edges_abgasanlage	5	0.001563	0.000781	
	edges_antrieb_hinten	5	0.001563	0.000781	
	edges_aussenspiegel	5	0.001563	0.000781	
	edges_fahnrwekr_vom	5	0.001563	0.000781	
	edges_hinterachse	5	0.001563	0.000781	
	edges_karosserie	5	0.001563	0.000781	
	edges_raeder_hinten	5	0.001563	0.000781	
	edges_raeder_vom	5	0.001563	0.000781	
	edges_staulippen_hinten	5	0.001563	0.000781	
	edges_staulippen_vom	5	0.001563	0.000781	
	edges_tunnelbruecke	5	0.001563	0.000781	
	edges_unterboden	5	0.001563	0.000781	
	edges_aussenspiegel_ref2	6	0.000781	0.000781	
	edges_fahnrwekr_vom_ref2	6	0.000781	0.000781	
	edges_hinterachse_ref2	6	0.000781	0.001172	
	edges_karosserie_ref2	6	0.000781	0.000781	
	edges_raeder_hinten_ref2	6	0.000781	0.001172	
	edges_raeder_vom_ref2	6	0.000781	0.001172	
	edges_staulippen_hinten_ref2	6	0.000781	0.001563	
	edges_staulippen_vom_ref2	6	0.000781	0.001563	
	edges_unterboden_ref2	6	0.000781	0.001172	
	edges_aussenspiegel_ref3	7	0.000391	0.000391	
edges_hinterachse_ref3	7	0.000391	0.000391		
edges_staulippen_hinten_ref3	7	0.000391	0.000391		
edges_staulippen_vom_ref3	7	0.000391	0.000391		
edges_unterboden_ref3	7	0.000391	0.000391		

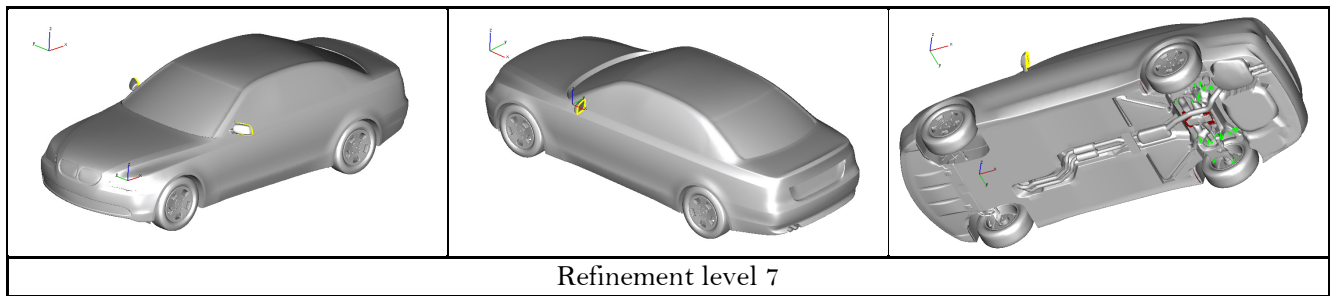
Zuerst wird eine Ausgangszellengröße durch *Max Cell Size* definiert. Auf diesen Wert beziehen sich alle Verfeinerungsstufen. Diese Größe haben dann auch die Zellen an den Rändern des *FAME Hexa* Gitters. Bei dem Verfeinerungsprozess wird darauf geachtet, dass immer nur um eine Stufe verfeinert wird. Bei Einstellung des *FAME Hexa* Vernetzers wurde aus der Gitterstudie, die im Abschnitt 3.1 betrachtet wurde, ausgegangen. Die Dicken der *Surface* und *Edge Refinements* wurden aus dem Fall *mio_11a* der Gitterstudie übernommen. Ebenso wurden auch die Dimensionen und Verfeinerungsstufen der 3D-Objekte Boxen übernommen. Sie sind nur um die Boxen *Box_car_1_mirrors*, *Box_car_1_mirror_right*, *Box_car_1_mirror_left* erweitert, die die Verfeinerung um die Seitenspiegel und deren Nachlaufs gewährleisten. Die Verfeinerung fängt mit *Refinement Level 1* von der *Box_car_around_ref2* an. Diese Box gewährleistet nur den einstufigen Übergang der Verfeinerung. Die Box *Box_car_BLT_ref* verfeinert Zellen in einer Schicht vor dem Fahrzeug und dient genauerer Ausbildung der Grenzschicht. Weiter folgen die Boxen *Box_car_wake*, *Box_car_around_1a*, *Box_car_around_1b* mit *Refinement Level 2*. Diese Boxen sind für die nahliegende Strömung und für den Nachlauf zuständig. An dieser Stelle sollte man erwähnen, dass Boxen *Box_car_BLT_ref*, *Box_car_around_ref2* und *Box_car_wake*, aus der *FAME Hexa* Domäne rausgehen. Damit wird das Gitter auch an dem vorderen und hinteren Rand verfeinert. Dadurch wird die Verfeinerung bei der Gittererweiterung weiter getragen, was ein feineres Gitter in dem ganzen Nachlauf und vor dem Fahrzeug bis zum Einlass in dem Grenzschichtbereich garantiert. Das Gitter in dem nachliegenden Bereich um das Fahrzeug wird durch Boxen des *Refinement Level 3* verfeinert. Es ist von Bedeutung dass das Gitter sowohl unterhalb als auch oberhalb des Fahrzeuges mit einem gleichen *Refinement Level* versehen wird. Dadurch bleibt die Strömung von dem Gitter unbeeinflusst. Mehr dazu wurde in der Kapitel 3.2 diskutiert.

	File Name	Fire Name	Center			Sides			Refinement level
			X	Y	Z	X	Y	Z	
Box refinements	Box_wheel_FL.prp	Box_0001	0.0	-0.275	-0.04	0.4	0.25	0.4	3
	Box_wheel_FR.prp	Box_0002	0.0	0.275	-0.04	0.4	0.25	0.4	3
	Box_wheel_RL.prp	Box_0003	1.154	-0.3	-0.04	0.4	0.2	0.4	3
	Box_wheel_RR.prp	Box_0004	1.154	0.3	-0.04	0.4	0.2	0.4	3
	Box_car_BLT_ref.prp	Box_0009	2.3	0.0	-0.14	6.2	1.3	0.2	1
	Box_car_wake.prp	Box_0007	3.15	0.0	0.16	4.5	1.2	0.8	2
	Box_car_around_1a.prp	Box_0005	-0.2	0.0	0.06	0.6	1.0	0.6	2
	Box_car_around_1b.prp	Box_0006	0.925	0.0	0.135	1.65	1.0	0.75	2
	Box_car_ground.prp	Box_0010	0.625	0.0	-0.125	2.05	0.8	0.23	3
	Box_car_around_ref2.prp	Box_0008	2.425	0.0	0.185	5.95	1.3	0.85	1
	Box_car_1_1.prp	Box_0011	0.626	0.0	0.043	2.0	0.79	0.3	3
	Box_car_1_2.prp	Box_0012	0.663	0.0	0.20975	1.926	0.79	0.0335	3
	Box_car_1_3.prp	Box_0013	0.7	0.0	0.24325	1.852	0.79	0.0335	3
	Box_car_1_4.prp	Box_0014	0.774	0.0	0.275	1.704	0.73	0.03	3
	Box_car_1_5.prp	Box_0015	0.848	0.0	0.305	1.556	0.67	0.03	3
	Box_car_1_6.prp	Box_0016	0.848	0.0	0.3275	1.26	0.64	0.015	3
	Box_car_1_7.prp	Box_0017	0.848	0.0	0.3425	1.112	0.61	0.015	3
	Box_car_1_8.prp	Box_0018	0.8295	0.0	0.3575	1.001	0.595	0.015	3
	Box_car_1_9.prp	Box_0019	0.82025	0.0	0.3725	0.9455	0.58	0.015	3
	Box_car_1_10.prp	Box_0020	0.811	0.0	0.3875	0.89	0.565	0.015	3
	Box_car_1_11.prp	Box_0021	0.80175	0.0	0.4025	0.8345	0.55	0.015	3
	Box_car_1_12.prp	Box_0022	0.80175	0.0	0.4175	0.7605	0.535	0.015	3
	Box_car_1_13.prp	Box_0023	0.80175	0.0	0.4325	0.6865	0.505	0.015	3
	Box_car_1_14.prp	Box_0024	0.80175	0.0	0.4475	0.6125	0.475	0.015	3
	Box_car_1_15.prp	Box_0025	0.80175	0.0	0.4625	0.4645	0.415	0.015	3
	Box_car_1_mirrors.prp	Box_0026	0.466	0.0	0.273375	0.3125	0.9	0.13125	3
	Box_car_1_mirror_right.prp	Box_0032	0.41	0.364	0.272	0.15	0.106	0.075	5
	Box_car_1_mirror_left.prp	Box_0031	0.41	-0.364	0.272	0.15	0.106	0.075	5
	Boundary layers	Selection		Number of layers		Ratio		Thickness [m]	
		boden_BL	3	3		0.0001			
	car_n_wheels_BL	3	3		0.0001				
	Surface intersection	Selection		Remove intersected cells					
		antrieb_hinten_ref4x	yes						
aussenspiegel_ref3x		yes							
hinterachse_ref3x		yes							
staulippen_hinten_ref3		yes							
staulippen_vorn_ref3		yes							

Für den Bereich unter dem Fahrzeug ist die Box *Box_car_ground* zuständig. Die Radhäuser sind durch Boxen *Box_wheel_XX* verfeinert. Die ganze Karosserie wird dann durch die Boxen *Box_car_XX* umhüllt. Damit die Oberfläche der Seitenspiegel detailgetreu bleibt, müssen die Boxen *Box_car_1_mirror_right*, *Box_car_1_mirror_left* mit einem *Refinement Level 5* versehen werden. Um Zellen zu sparen werden *Refinement Level 4* und höher weiterhin ausschließlich durch *Surface* und *Edge Selection* realisiert. Die *Surface Refinements* werden nicht nur in den Staupunkten, sondern auch zu einer detailgereuen Darstellung einzelner Bauteile benutzt. Somit werden die Felgen, die Abgasanlage, die Tunnelbrücke, die komplette Hinterachse, die Antriebswellen, das Differential, die Bremsscheiben, die Querlenker, die Spurstangen, der Stabilisator, die Seitenspiegel, der Grill mit Frontschürze, die Scheinwerfer und die Staulippen mit einem *Refinement Level 5* versehen. Höhere Verfeinerungsstufen gewährleisten nur eine

richtige geometrische Abbildung und an schmalen Teilen vermeiden sie die Durchdringung der Zellen durch die Flächen. Aus diesem Grund wird das *Refinement Level 6* an den kompletten Seitenspielen, Querlenkern, Spurstangen, Staulippen, an dem Stabilisator, an schmalen Teilen der Hinterachse und des Differentials, an den Löchern für die Radschrauben angewandt. Als äußerst empfindlich auf die Zellendurchdringung oder auf die Deformation der Abrundungen zeigen sich die schmalen Teile der Hinterachse, die Rippen des Differentials, die Abrundung der Seitenspiegelkante und die Staulippen. An diesen Stellen wird das *Refinement Level 7* verwendet.

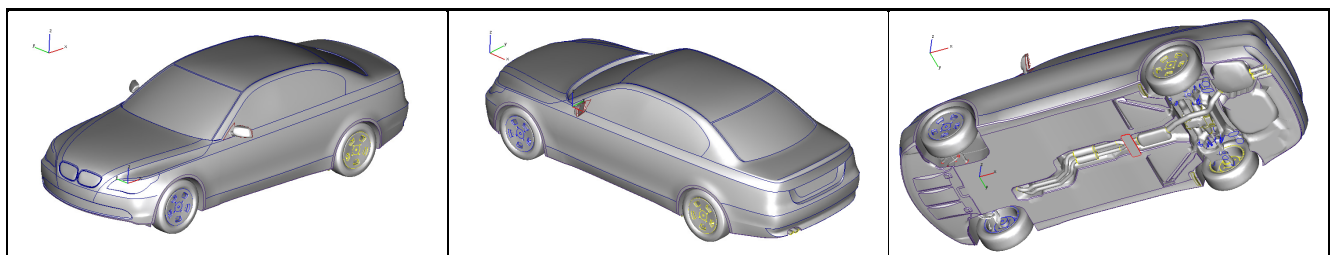




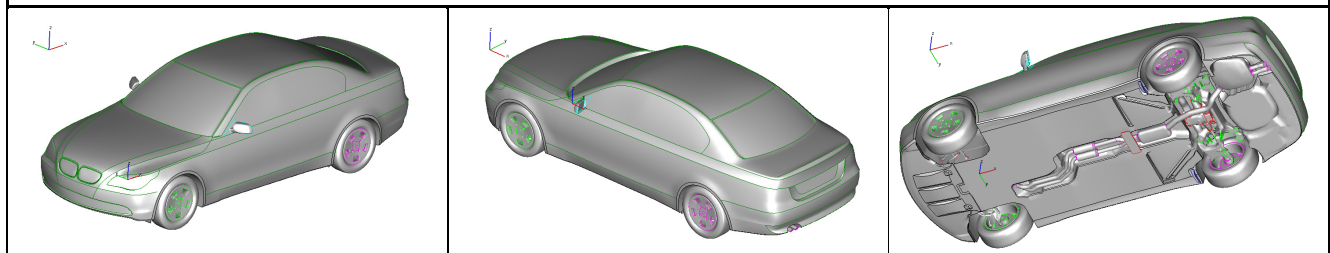
Refinement level 7

Bild 4.1: *Selections* der Flächenverfeinerung, Stufe ref1, ref2 und ref3.

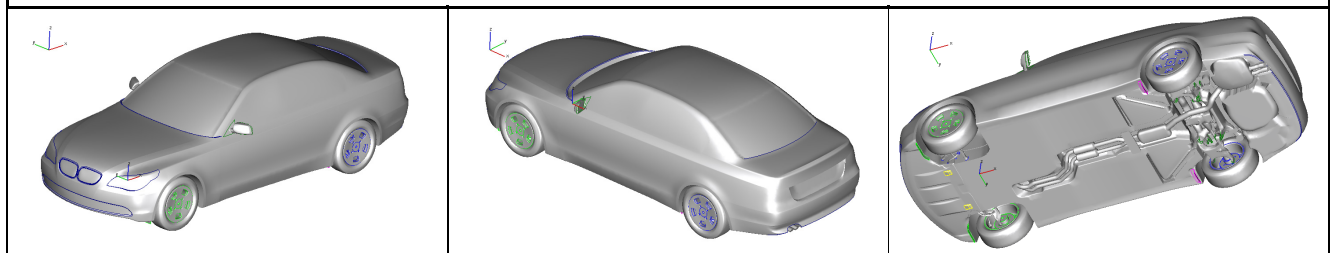
Bei dem *Edge Refinement* wird im Gegenteil zum *Surface Refinement* das *Refinement Level 4* angewandt. Durch die Verfeinerungsdicke wird erreicht, dass Bereiche um die Kanten und Krümmungen, also um die Stellen, wo sich die Strömung ablösen könnte, breiter verfeinert werden. Dadurch wird eine korrekte Ausbildung der Ablösungen gewährleistet. Bei geraden Flächen werden keine Ablösungen erwartet, aus diesem Grund wird dort eine dickere Verfeinerungsschicht nicht benötigt. Sowohl das *Refinement Level 4* als auch das *Refinement Level 5* erfassen alle führende und relevante Kanten an der Karosserie, Felgen, Abgasanlage, Tunnelbrücke, an der kompletten Hinterachse, Antriebswellen, Differential, Bremsscheiben, Querlenker, Spurstangen, Stabilisator, Seitenspiegel, an dem Grill mit Frontschürze, Scheinwerfer und an den Staulippen. Eine weitere Verfeinerungsstufe brauchen vor allem Kanten, die nah zueinander liegen. Damit beide Kanten behalten bleiben, müssen zwischen denen mehrere Zellen liegen. Die entsprechende Zellgröße wird dann durch *Refinement Level 6* bzw. *Refinement Level 7* realisiert. *Refinement Level 6* wird bei dem Grill mit Frontschürze, Scheinwerfern, Windlauf, Heckschürze, Seitenspiegeln, Heckklappe, Querlenkern, Spurstangen, Stabilisator, bei schmalen Teilen der Hinterachse und des Differentials, bei Felgen, Bremsscheiben und bei den Staulippen angewandt. Das feinste *Refinement Level 7* wird noch bei den Seitenspiegeldreiecken, bei schmalen Teilen der Hinterachse und bei den Staulippen benötigt.



Refinement level 4



Refinement level 5



Refinement level 6

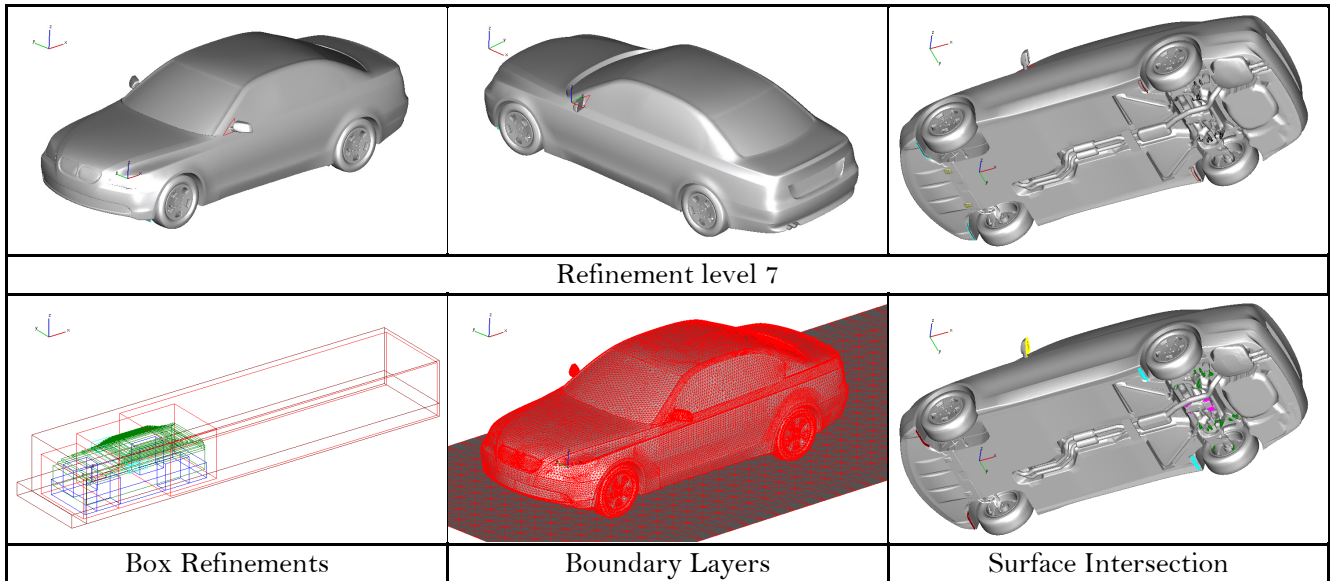


Bild 4.2: *Selections* für Kantenverfeinerung (Stufe ref, ref1, ref2, ref3), für die *Boundary Layers* Generierung, für die *Surface Intersection* Funktion und die Boxenanordnung.

Weiter kann aus dem Bild 4.2 entnommen werden, bei welchen *Selections* die *Boundary Layers* aufgebaut werden. Zu dem kompletten Fahrzeug wurde diesmal auch die Fahrbahn mitgenommen.

Im Vergleich zu der Gitterstudie Kapitel 3 wurde eine weitere Funktion so genannte *Surface Intersection* benutzt. Diese Funktion verhindert die Durchdringung der Zellen durch schmale Flächen dort, wo ihr Abstand vergleichbar mit der Zellgröße ist. Die *Surface Intersection* wird bei den Seitenspiegelkanten, Staulippen, bei schmalen Teilen der Hinterachse und des Differentials angewandt.

Die *FAME Hexa* Domäne bildet ein Viereck und ist $6m$ lang, $1,6m$ breit und $1m$ hoch. Außer den Verfeinerungsbereichen für die Grenzschicht und den Nachlauf haben sie Zellen an den äußeren Wänden eine Größe von $0,05m$. Durch die Funktion *Enlarge* in *AVL Fire GUI* wird die *FAME Hexa* Domäne mit zum Teil strukturiertem Gitter umhüllt. Dabei werden zwei Gitterkonfigurationen untersucht.

Die erste Variante, bezeichnet als *IO* (eine Abkürzung von *Inlet-Outlet*), stellt eine rechteckige Domäne dar, die mit einer Breite von $5,77m$ und Höhe von $3,47m$ dem Düsenaustritt des BMW Windkanals entspricht. Die Länge beträgt $20m$ damit der Nachlauf genug Raum zum Dissipieren hat und den Auslass nicht stört. Die Einlassebene ist im Bezug zu dem Fahrzeugmodell in einer bestimmten Entfernung. Für weiteren Zusammenhang sollte an dieser Stelle erwähnt werden, dass der Ursprung des Koordinatensystems sich in der Achse des Vorderrads befindet und die vordere Wand des *FAME Hexa* Gitters sich in einer Entfernung von $x = -0,7m$ liegt. Nach Schrefl (Schrefl 2008) wurde in einer Entfernung von $x = -2,5m$ eine Grenzschichtdicke $\delta(x) = 0,07m$ gemessen.

Anhand der empirischen Gleichung für Grenzschichtdicke bei einer ebenen Platte wurde der Ursprung der Grenzschicht festgestellt (vgl. Jakirlic 2013a: 3):

$$\delta(x) = \frac{0,37x}{Re_x^{1/5}} \quad (4.1)$$

$$Re_x = \frac{U_\infty \rho x}{\mu} \quad (4.2)$$

$$x = \left(\frac{\delta(x)^5 U_\infty \rho}{0,37^5 \mu} \right)^{1/4} = \left(\frac{0,07^5 \cdot 38,89 \cdot 1,189}{0,37^5 \cdot 0,00001824} \right)^{1/4} = 4,979m \quad (4.3)$$

Die Einlassebene wurde also in einer Entfernung von $x = -7,5m$ positioniert.

Die Tabelle 4.2 beschreibt alle Blöcke aus denen das numerische Gitter zusammgebaut wurde. Die *IO* Variante braucht immer nur ein Block in allen fünf Richtungen. Um die Zellen zu sparen wächst die Zellgröße.

Ausgangswert bildet die Auflösung bei dem *FAME Hexa* Gitter von *0,05m*. Weiter ist dort die Anzahl der Reihen, die Wachstumsrate und die Richtung der Erweiterung erwähnt. Entsprechende Schritte die man dabei in *AVL Fire GUI* tätigen muss, wurden bereits in dem Kapitel 3.1 beschrieben.

Bei der zweiten Gittervariante wurde exakt der BMW Windkanal mit seiner Düse, Plenum, Kollektor und mit Abrundungen des Kollektoreintritts abgebildet. Dabei bleibt das Gitter weiterhin strukturiert, muss aber aus vielen Teilen gebaut werden. Eine Herausforderung dabei stellen die Abrundungen des Kollektoreintritts dar. Es muss zuerst ein *Surface* rotiert werden. Aus so entstehendem Halbzylinder wird seine Fläche in einer Richtung mit mehreren Schichten erweitert und anschließend auf eine gerade Ebene projiziert. In *AVL Fire GUI* sind folgende Schritte nötig: die Gitterauflösung in Querrichtung wird übernommen und ein *Surface* mit einer Hälfte der Bauteilhöhe generiert *Surface* → *Make surface*, dieses *Surface* wird um 180° um eine Linie rotiert *Enlarge* → *Rotate: Number of Subdivisions 13, Angle 180, Rotate using two Points – 2D Objects Line*. Die Fläche wird mit zwei Schichten erweitert *Enlarge* → *Extrude: Vector, Layers 2, Length 0,1, Vector -1 0 0*. So entstandenes Gitter wird auf eine gerade Ebene projiziert *Enlarge* → *Project: constant X coordinate*. Schließlich werden die Zellschichten in der *x* Richtung generiert *Refine* → *Redimension: Number of distributions 23*. Damit bekommt man die Bauelemente Nummer *3d*. Weil der Querschnitt von der Düse und dem Kollektor unterschiedliche Abmessungen hat, wurden die Bauelemente Nummer 2 benutzt. Das Plenum ist *11,16m* lang, *10,35m* breit und *9m* hoch. Weitere Abmessungen einzelnen Bauteilen sind detailliert in der Tabelle 4.2 beschrieben. Ein wichtiger Unterschied zu der ersten Gittervariante ist, dass das Gitter an mehreren Stellen eine Wand-Randbedingung haben wird. Aus diesem Grund wurde jede Wand manuell durch *Refine* → *Redimension* mit drei *Boundary Layers* versehen.

Tabelle 4.2: Gitterbauteile mit ihren Abmessungen, Zellgrößen und Schichtenanzahl.

RealCar_Calculation4										
		Dimensions			Cell Size		Rows	Grow Rate	Direction	
		x [m]	y [m]	z [m]	min [m]	max [m]				
HEXA		6	1,6	1						
front	1	6,8	5,77	3,47	0,05	0,1	90,67	90	2	x-
back	1	7,2	5,77	3,47	0,05	0,1	96	96	2	x+
right	1	6	2,085	1	0,05	0,08	32,08	32	1,6	y+
left	1	6	2,085	1	0,05	0,08	32,08	32	1,6	y-
up	1	6	5,77	2,47	0,05	0,075	39,52	39	1,5	z+
mesh		20	5,77	3,47						
front	1	4,03	1,6	1	0,05	0,1	53,73	54	2	x-
back	1	1,13	1,6	1	0,05	0,05	22,6	23	1	x+
right	1	11,16	2,085	1	0,05	0,08	32,08	32	1,6	y+
	2	11,16	0,16	1	0,08	0,08	2	2	1	y+
	3a	10,03	1	1	0,08	0,08	12,5	13	1	y+
	3b	1,13	1	1	rotate + enlarge + project					
left	4	11,16	1,13	1	0,08	0,16	9,417	9	2	y+
	1	11,16	2,085	1	0,05	0,08	32,08	32	1,6	y-
	2	11,16	0,16	1	0,08	0,08	2	2	1	y-
	3a	10,03	1	1	0,08	0,08	12,5	13	1	y-
up	3b	1,13	1	1	rotate + enlarge + project					
	4	11,16	1,13	1	0,08	0,16	9,417	9	2	y-
	1	11,16	10,35	2,47	0,05	0,0755	39,36	39	1,51	z+
	2	11,16	10,35	0,43	0,0755	0,08	5,531	5	1,06	z+
nuzzle	3a	10,03	10,35	1	0,08	0,08	12,5	13	1	z+
	3b	1,13	6,09	1	rotate + enlarge + project					
	3c,d	1,13	2,13	1	0,08	0,08	12,5	13	1	z+
	4	11,16	10,35	4,1	0,08	0,24	25,63	25	3	z+
collector		2,77	5,77	3,47	0,1	0,1	27,7	28	1	x-
collector		4,87	6,09	3,9	0,05	0,1	64,93	65	2	x+
mesh		18,8	10,35	9						

Wie schon erwähnt, wurden für die Abrundungen des Kollektoreintritts die Bauelementen Nummer *3d* benutzt. Weil die Zellschichten von gerade bis rund übergehen und an Stellen der Abrundungen fehlen, müssen die Zellen im Gitter durch ein Interface verbunden werden. In *AVL Fire GUI* erfolgt dies durch *Connect/Split* → *Arbitrary connect*. Weitere Einstellungen zeigt die Tabelle 4.3.

Tabelle 4.3: Liste der in diesem Kapitel verwendeten Interfaces, mit dazugehörigen *Selections*, Zellenanzahl und weiteren Einstellungen.

Mesh	Interface					project to interface A	remaining boundary face parts
	Arbitrary interface	interface A	# cells	interface B	# cells		
test3-3-G-8i-2b_IO_RealCar.flm							
test3-3-G-7i-8b_IO_RealCar.flm							
test3-3-G-7i-8b_RealCar.flm	Interface1	interface_left-inner	416	interface_left-outer	416	yes	ignore
	Interface2	interface_right-inner	416	interface_right-outer	416	yes	ignore
	Interface3	interface_left-lower	416	interface_left-upper	416	yes	ignore
	Interface4	interface_right-lower	416	interface_right-upper	416	yes	ignore

Tabelle 4.4 zeigt die Anzahl von Zellen der beiden fertigen Gittervarianten.

Tabelle 4.4: Liste der in diesem Kapitel verwendeten Gitter mit Zellenanzahl.

Project	Case	Mesh	No. of cells
RealCar_Calculation4		test3-3-G-8i-2b_IO_RealCar.flm	27802945
		test3-3-G-7i-8b_IO_RealCar.flm	28271060
		test3-3-G-7i-8b_RealCar.flm	31621561

Bedenkt man, dass aus dem Fall *mio_11a* der Gitterstudie ausgegangen wurde, benötigte das detaillierte Fahrzeugmodell im Vergleich zu dem vereinfachten um 16,1 Millionen mehr Zellen.

In dem Kapitel 3 Umströmung eines vereinfachten Fahrzeuges (*SingleCar*): Gitterstudie wurde erwähnt, dass bei einer Fläche, die nicht geschlossen ist, die Kräfte auf der Oberfläche in Richtung senkrecht zu der Öffnung auch auf der Flächeninnenseite berechnet und somit falsch ausgewertet werden. Weil die Räder durch den Boden aufgeschnitten sind, entsteht dieses Problem beim Auswerten des Auftriebs.

Um dies zu verhindern wird in diesem Kapitel eine Lösung vorgeschlagen. Dabei ist die Radoberfläche geschlossen und das Rad schwebt in der Luft. Der Abstand zwischen Rad und Boden beträgt nur $0,018\text{mm}$, somit findet keine Strömung unter dem Rad statt.

Um zu prüfen, ob die Lösung relevant ist, wurden zwei Gitter generiert und getestet. Das Modellfahrzeug beim Gitter *test3-3-G-8i-2b_IO_RealCar.flm* hat durch den Boden aufgeschnittene Räder, Bild 4.3 links. Gitter *test3-3-G-7i-8b_IO_RealCar.flm* hat schwebende Räder, Bild 4.3 rechts. Dabei hat sich die Bodenfreiheit nur um 4mm vergrößert. Der Unterschied zwischen beiden Gittern beträgt 468 Tausend Zellen.

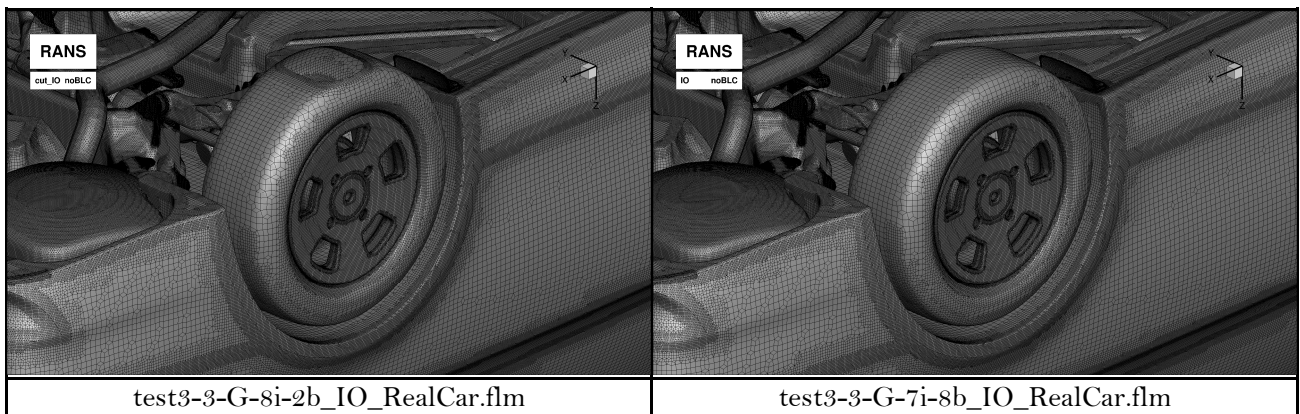


Bild 4.3: Darstellung der Anbringung der Räder auf den Boden.

Bei manchen Fällen wird eine Grenzschichtabsaugung verwendet. Stelle für die Absaugung entspricht der beim BMW Windkanal und befindet sich bei dem Düsenaustritt. Genaue Abmessungen sind vertrauliche Informationen, deswegen wurden sie aus dem Bild 4.4 links abgeschätzt.

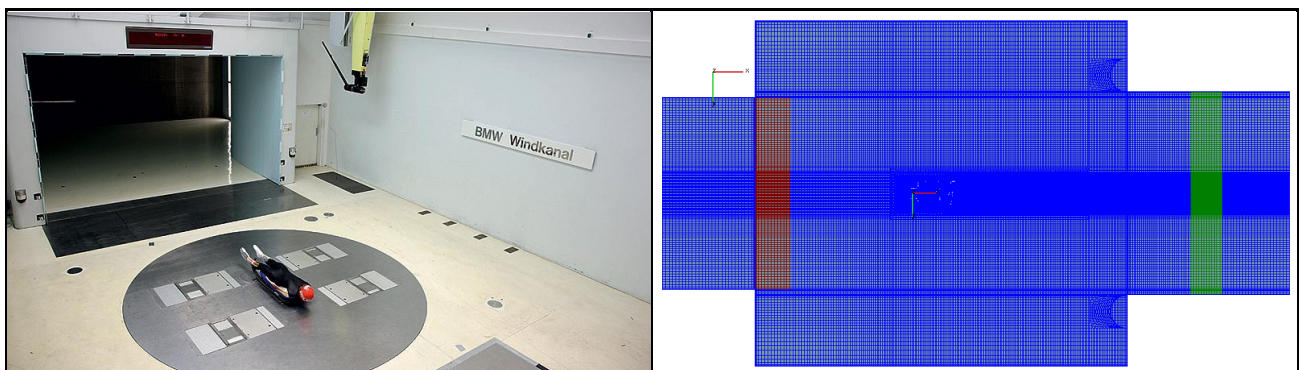


Bild 4.4: Grenzschichtabsaugung im Windkanal; Abschätzung und Realisieren der Ein- und Austrittflächen.

Auf dem Bild 4.4 rechts ist nicht nur die Absaugung sondern auch die Stelle, wo die Luftmenge wieder zugefügt wird, zu sehen. Die Absaugung hat eine Fläche $5,77\text{m} \times 1,04294\text{m}$, die Zuführung ist dann $6,09\text{m} \times 0,94122\text{m}$.

Wegen der Zellenanordnung konnte das Flächenverhältnis nicht identisch beibehalten werden. Bei der Bedingung eines konstanten Volumenstromes wurde der Flächenunterschied durch die Geschwindigkeit der Ausströmung kompensiert.

4.2. Ergebnisauswertung und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse diskutiert. Zuerst werden sie strömungstechnisch betrachtet. Anschließend folgt eine Betrachtung aus Sicht der Computertechnik.

4.2.1. Strömungstechnische Auswertung

Dieses Kapitel enthält 15 Simulationen. Zuerst wurde untersucht, ob das Gitter mit aufgeschnittenen Rädern durch das Gitter mit schwebenden Rädern ersetzt werden kann, bzw. ob beide Gitter gleiche Ergebnisse liefern. Dabei wurde auch der Einfluss der Diskretisierungsschemata getestet. Als Nächstes wurde die rechteckige *IO* Domäne mit dem Nachbau des BMW Windkanals in Vergleich gesetzt. Anschließend wurde der Einfluss der Grenzschichtabsaugung *BLC* untersucht.

4.2.1.1. Anbringung der Räder

Der Einfluss der Anbringung der Räder wurde auf der *IO* Gittervariante untersucht. Die *IO* Variante entspricht der einfachsten und traditionellen Geometrie, die für eine Fahrzeugumströmung benutzt wird. Damit bleiben die potenziellen Einflüsse der Windkanalgeometrie ausgeschlossen. Der Vergleich beschränkt sich nur auf die *RANS* Simulationen. Cases, die als *Wheels-cut_* bezeichnet werden, repräsentieren die Version mit aufgeschnittenen Rädern. Cases *Wheels_* haben alle schwebende Räder. Folgender Vergleich bezieht sich auf Cases *Wheels-cut_IO-RANS* und *Wheels_IO-RANS*. Auf dem Bild 4.5 werden die Beiwerte von dem Luftwiderstand c_d , der Seitenkraft c_s und von dem Auftrieb c_l verglichen. Das Verhalten zeigt einen ähnlichen Charakter.

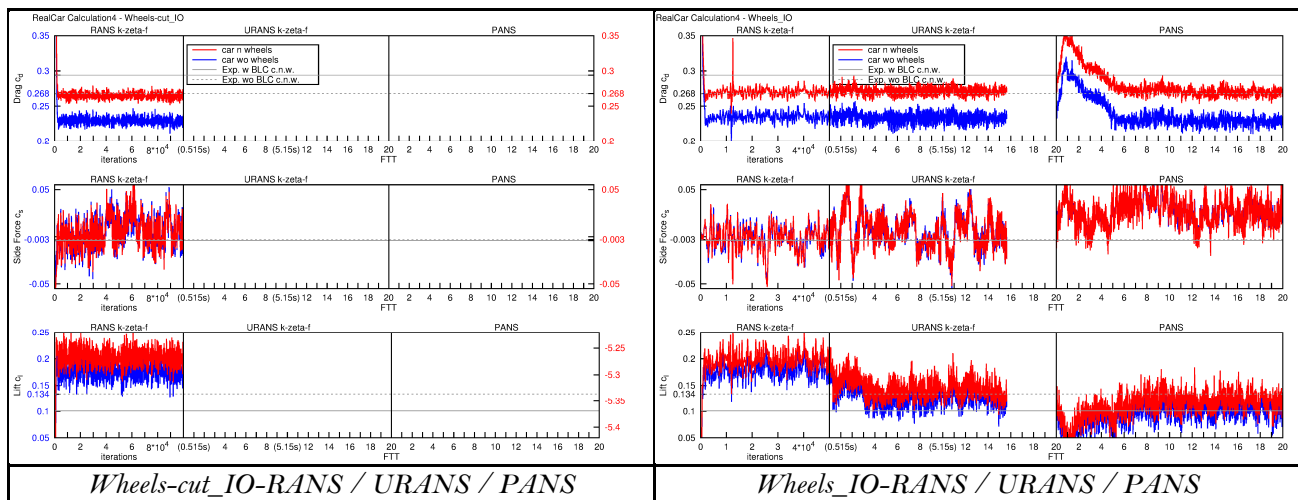


Bild 4.5: Verläufe des Luftwiderstands c_d , der Seitenkraft c_s , des Auftriebs c_l bei unterschiedlicher Anbringung der Räder.

Anhand der Tabelle 4.5 ist eine gute Übereinstimmung nachgewiesen. Die Werte für die *Selections car_n_wheels* und *car_wo_wheels* wurden aus der Tabelle 4.6 entnommen. Durch ihres Subtrahieren bekommt man Luftwiderstände nur für die Räder. Die letzte Zeile zeigt den Unterschied zwischen beiden Simulationen.

Tabelle 4.5: Luftwiderstandsbeiwerte der Räder bei unterschiedlicher Anbringung auf den Boden.

Case	Solver	wheels:cD:-	wheels:cS:-	wheels:cL:-
Wheels-cut_IO	RANS	0,0355	-0,00014	-5,4464
Wheels_IO	RANS	0,0346	-0,00054	0,0179
-cut_IO vs. _IO	delta	0,0009	0,00040	

Der Luftwiderstand c_d der Räder ändert sich auf vierter Nachkommastelle, was akzeptabel ist. Die Seitenkraft c_s oszilliert mit sehr langer Periode und hat stochastischen Charakter, deswegen ist sie für diesen Vergleich nicht relevant.

Das Bild 4.6 zeigt einen Vergleich von Druckbeiwerten c_p der beiden Fälle, dazu sind dort auch die Messwerte aus dem Experiment aufgetragen. Die schwarzen Linien verbinden einzelne Messpunkte an der Fahrzeugoberfläche. Grau sind die experimentellen Werte aufgetragen und die hellen Farben gehören dem Case *Wheels_IO-RANS*. Bei den Druckbeiwerten lässt sich wieder eine gute Übereinstimmung zwischen den beiden Simulationen beobachten, die Farbpunkte überlappen sich fast bei jeder Messstelle.

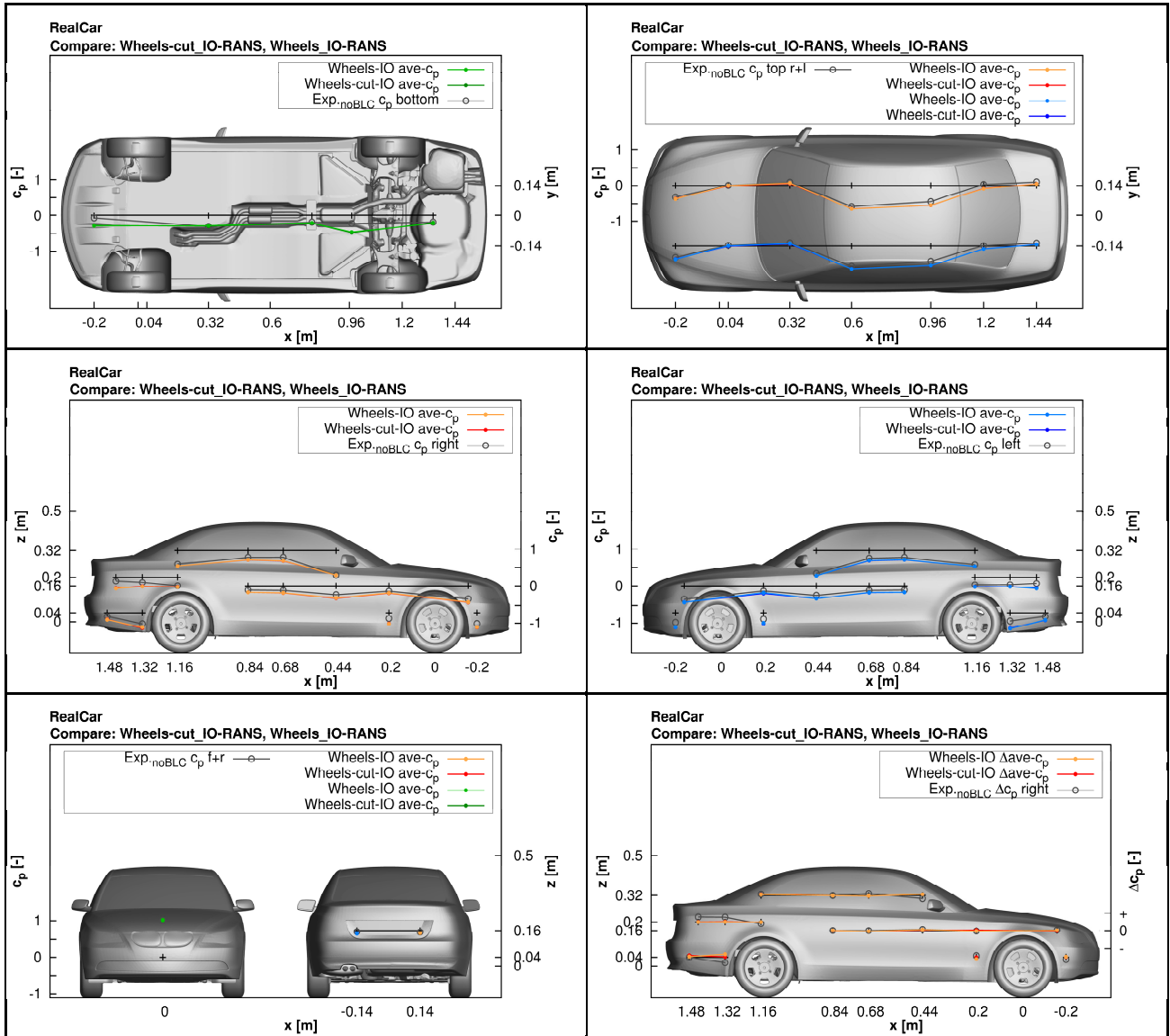


Bild 4.6: Werte des gemittelten Druckbeiwerts c_p in Messpunkten am Bug, am Heck, auf der linken und rechten Seite, auf der Ober- und Unterseite bei unterschiedlicher Anbringung der Räder.

Bei dem Teilbild rechts unten, wo der Δc_p -Wert, also der Unterschied zwischen der rechten und linken Fahrzeugseite, abgebildet ist, sind leichte Abweichungen hinter dem Vorder- und Hinterrad zu beobachten.

Weiter werden verschiedene Strömungseigenschaften miteinander verglichen. Nach dem gemittelten Druckbeiwert c_p auf der Fahrzeugoberfläche folgt die gemittelte Geschwindigkeitskomponente U in der $y = 0m$ Ebene, danach werden das gemittelte Q -Kriterium und die Wirbelstärke gezeigt.

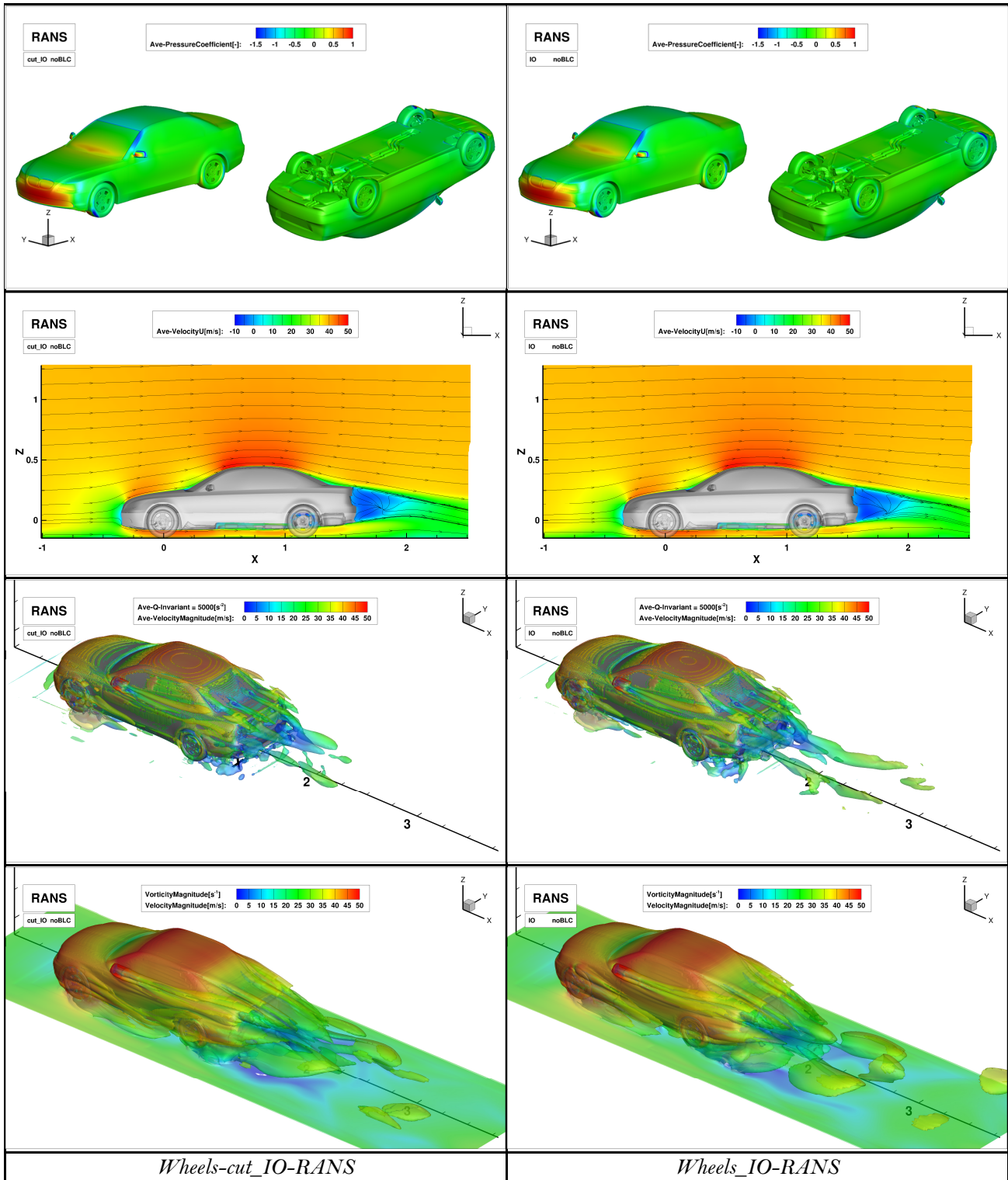


Bild 4.7: Vergleich des gemittelten Druckbeiwerts c_p auf der Oberfläche des *RealCar*, der gemittelten U -Geschwindigkeit im Längsmittelschnitt, der Strukturen des gemittelten Q-Kriteriums und der Wirbelstärke bei unterschiedlicher Anbringung der Räder.

Der Druckbeiwert c_p im Bereich der Räder weist keine Änderungen auf. Die Strömung zwischen der Fahrbahn und dem Fahrzeugunterboden ist anhand des Geschwindigkeitsplots unverändert geblieben. Die Isoflächen des Q-Kriteriums und der Wirbelstärke bilden hinter den Rädern sehr ähnliche Strukturen. Der Hufeisenwirbel ist bei beiden Simulationen präsent.

Eine vernachlässigbare Änderung des Luftwiderstandes c_d , die Übereinstimmung des Druckbeiwertes c_p in den Messpunkten und die Ähnlichkeit der Strömung um die Räder herum bestätigt, dass man für weitere Simulationen das Gitter mit schwebenden Rädern verwenden kann.

4.2.1.2. Einfluss der Diskretisierungsschemata

In diesem Kapitel wird auf den Einfluss von Diskretisierungsschemata eingegangen. Die Finite-Volumen-Methode berechnet die Werte in den KV-Mittelpunkten. Dabei wird der konvektive Fluss auf die Zellflächen mittels verschiedener Diskretisierungsschemata approximiert. Hier wird das in dieser Arbeit benutzte *AVL SMART Relaxed* Schema mit dem häufig benutzten CDS Schema (*central differencing scheme*) bei einem Einsatz in der Kontinuitätsgleichung gegenüber gestellt. Bei den Luftwiderständen handelt es sich um Flächenwerte; deswegen wird die Approximation durch die Diskretisierungsschemata anhand des Luftwiderstandes c_d und Auftriebes c_l untersucht. Insgesamt wurden drei Fälle (*Wheels-cut_IO-CDS-RANS*, *Wheels_IO-CDS-RANS*, *Wheels_IO-CDS-URANS*) mit dem CDS Schema und drei Fälle (*Wheels-cut_IO-RANS*, *Wheels_IO-RANS*, *Wheels_IO-URANS*) mit dem *AVL SMART Relaxed* Schema berechnet. Es ist wichtig zu erwähnen, dass bei beiden RANS Simulationen mit dem CDS Schema nur 6000 bzw. 8000 Iterationen und bei der URANS CDS Simulation 5 *FTT* berechnet wurden. Aus diesem Grund sollte man ihre Ergebnisse nur qualitativ betrachten.

Das Bild 4.8 zeigt den Verlauf der Luftwiderstände bei Simulationen mit dem CDS Schema. Verläufe von den Simulationen mit dem *AVL SMART Relaxed* Schema können aus dem Bild 4.5 und Bild 4.10 entnommen werden.

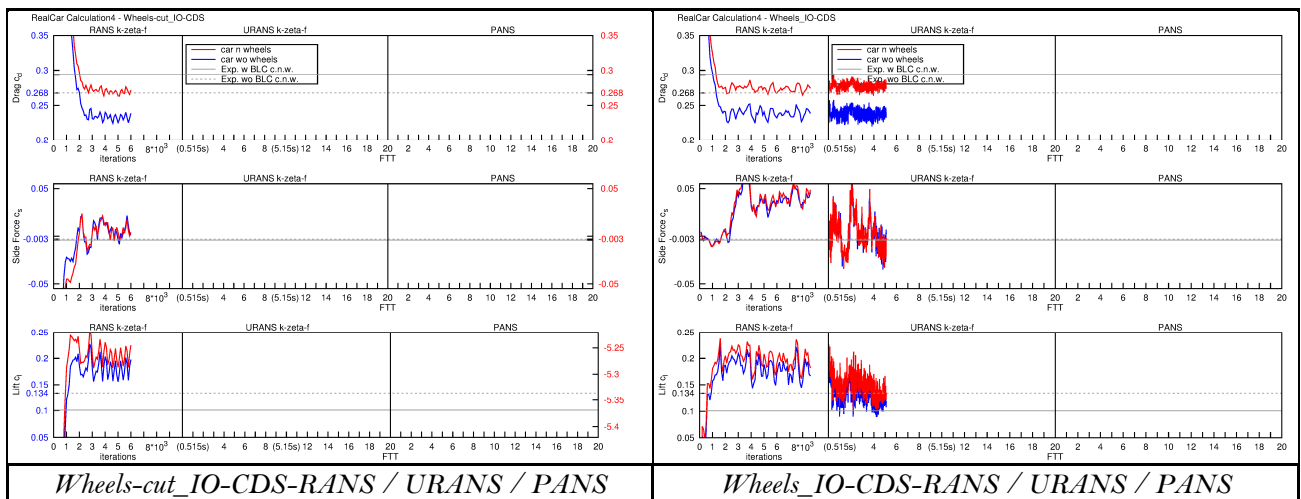


Bild 4.8: Verläufe des Luftwiderstands c_d , der Seitenkraft c_s , des Auftriebes c_l der Berechnungen mit einem CDS Schema.

Dank der Linearinterpolation, was eigentlich das CDS Schema darstellt, hat der Luftwiderstand c_d und der Auftrieb c_l bei den Simulationen *Wheels-cut_IO-CDS-RANS*, *Wheels_IO-CDS-RANS* und *Wheels_IO-CDS-URANS* einen mehr harmonischen Verlauf. Andererseits ist das *AVL SMART Relaxed* Schema ein TVD (*total variation diminishing*) Schema mit einer Beschränktheitsbedingung und ist somit stabiler.

Der Graf auf dem Bild 4.9 zeigt einen gemittelten Luftwiderstand c_d und Auftrieb c_l bei allen sechs Simulationen.

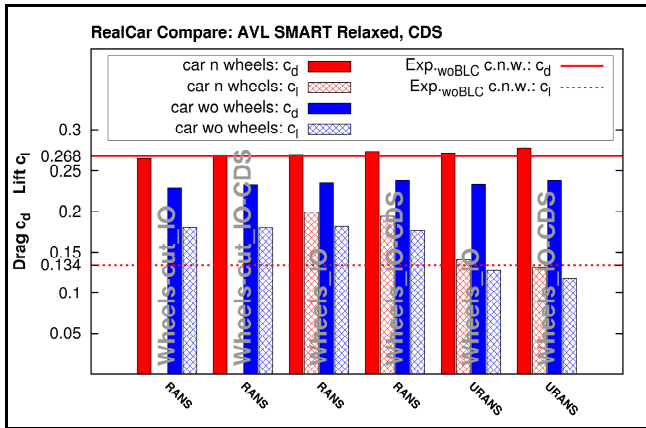


Bild 4.9: Histogramm des Luftwiderstands c_d und des Auftriebs c_l des *RealCar* mit und ohne Räder bei CDS und *AVL SMART Relaxed* Schema.

Die CDS Simulationen sollte man eher qualitativ betrachten; trotzdem ist aber eine Tendenz deutlich. Bei allen CDS Simulation wird der Luftwiderstand c_d erhöht während der Auftrieb c_l erniedrigt wird. Dieses Phänomen der Verbindung zwischen Luftwiderstand c_d und Auftrieb c_l ist bekannt, tritt oft auf, sollte aber nicht künstlich durch das Diskretisierungsschema gestärkt werden. Der Graf auf dem Bild 4.9 zeigt ein ähnliches Verhalten bei beiden Schemata, womit auch die Anwendung des *AVL SMART Relaxed* Schemas verifiziert wurde.

4.2.1.3. Einfluss des Windkanals und der Grenzschichtabsaugung *BLC*

Simulationen in diesem Kapitel beziehen sich auf eine experimentelle Messung von Schrefl (Schrefl 2008) im BMW Windkanal. Die Luftwiderstände, Momente und Druckverläufe wurden sowohl mit als auch ohne Grenzschichtabsaugung *BLC* (*boundary layer control*) gemessen. Die Grenzschicht, die sich vor dem Düsenaustritt aufgebaut hat, wird bei diesem Windkanal durch einen Schlitz im Boden abgesaugt. Die Rotation der Räder wurde in beiden Fällen vernachlässigt.

Die Tabelle 4.6 bietet eine Übersicht über alle durgeführten Simulationen und zeigt Luftwiderstandsbeiwert c_d , Seitenkraftbeiwert c_s und den Auftriebsbeiwert c_l vom Fahrzeugmodell mit und ohne Räder. Messungen und Simulationen mit Grenzschichtabsaugung *BLC* sind grün markiert; ohne *BLC* blau.

Tabelle 4.6: *Realcar* - Luftwiderstandsbeiwerte vom Fahrzeug mit und ohne Räder.

Case	Solver	car_n_wheels:cD:-	car_n_wheels:cS:-	car_n_wheels:cL:-	car_wo_wheels:cD:-	car_wo_wheels:cS:-	car_wo_wheels:cL:-
Exp.	w BLC	0,2940	-0,00400	0,1010			
Exp.	wo BLC	0,2680	-0,00300	0,1340			
Wheels-cut_IO	RANS	0,2650	0,00641	-5,2663	0,2294	0,00654	0,1802
Wheels-cut_IO-CDS	RANS	0,2696	0,00525	-5,2650	0,2331	0,00542	0,1796
Wheels_IO	RANS	0,2700	-0,00070	0,1994	0,2354	-0,00016	0,1815
	URANS	0,2720	0,00406	0,1408	0,2337	0,00370	0,1273
	PANS	0,2708	0,02831	0,1224	0,2297	0,02801	0,1070
Wheels_IO-CDS	RANS	0,2738	0,03851	0,1946	0,2382	0,03658	0,1767
	URANS	0,2779	-0,00554	0,1317	0,2382	-0,00449	0,1185
Wheels_IO-BLC	RANS	0,2645	-0,00670	0,1189	0,2275	-0,00728	0,0992
	URANS	0,2780	0,01541	0,0478	0,2312	0,01580	0,0362
Wheels	RANS	0,2640	-0,00351	0,2027	0,2296	-0,00317	0,1847
	URANS	0,2670	0,00683	0,1499	0,2290	0,00604	0,1363
	PANS	0,2632	0,01690	0,1141	0,2214	0,01731	0,0992
Wheels-BLC	RANS	0,2591	0,00415	0,1833	0,2274	0,00371	0,1666
	URANS	0,2632	0,00793	0,1294	0,2265	0,00725	0,1146
	PANS	0,2640	0,03038	0,1095	0,2224	0,03101	0,0969

Tabelle 4.7 zeigt den Rollmomentbeiwert c_{M_x} , den Nickmomentbeiwert c_{M_y} und den Giermomentbeiwert c_{M_z} .

Tabelle 4.7: *Realcar* - Momentenbeiwerte vom Fahrzeug mit und ohne Räder.

Case	Solver	car_n_wheels:cMx:-	car_n_wheels:cMy:-	car_n_wheels:cMz:-	car_wo_wheels:cMx:-	car_wo_wheels:cMy:-	car_wo_wheels:cMz:-
Exp.	w BLC	0,0030	-0,02700	0,0090			
Exp.	wo BLC	0,0050	-0,04200	0,0050			
Wheels-cut_IO	RANS	0,0036	-0,07232	-0,0005	0,0028	-0,08005	-0,0004
Wheels-cut_IO-CDS	RANS	0,0036	-0,07205	0,0001	0,0026	-0,07997	-0,0004
Wheels_IO	RANS	0,0006	-0,07946	0,0021	0,0007	-0,08445	0,0019
	URANS	0,0014	-0,06040	0,0010	0,0016	-0,06786	0,0008
	PANS	0,0086	-0,05592	-0,0093	0,0085	-0,06394	-0,0097
Wheels_IO-CDS	RANS	0,0121	-0,08112	-0,0120	0,0117	-0,08688	-0,0119
	URANS	-0,0001	-0,05880	0,0052	0,0003	-0,06683	0,0048
Wheels_IO-BLC	RANS	-0,0007	-0,05592	0,0036	-0,0003	-0,06281	0,0036
	URANS	0,0056	-0,03598	-0,0040	0,0055	-0,04534	-0,0043
Wheels	RANS	0,0000	-0,08107	0,0014	0,0001	-0,08606	0,0008
	URANS	0,0030	-0,06418	-0,0019	0,0030	-0,07123	-0,0025
	PANS	0,0057	-0,05407	-0,0054	0,0057	-0,06259	-0,0061
Wheels-BLC	RANS	0,0018	-0,07119	-0,0005	0,0019	-0,07538	-0,0006
	URANS	0,0032	-0,05647	-0,0017	0,0034	-0,06395	-0,0020
	PANS	0,0088	-0,05045	-0,0066	0,0086	-0,05714	-0,0064

Gängige Praxis bei Strömungssimulationen um ein Fahrzeug stellt eine rechteckige Simulationsdomäne dar. Die Grenzschichtabsaugung wird dabei durch so genannte *slipwall* Randbedingung auf dem Boden wiedergegeben. Dies stellen Simulationen mit der Bezeichnung *IO* dar. Das Imitieren der Grenzschichtabsaugung durch die *slipwall* Randbedingung wurde bei Simulationen *Wheels_IO-BLC* benutzt.

Simulationen, bei denen der komplette Windkanal mit seiner Düse, Kollektor und Plenum, vernetzt und simuliert wurde, werden ohne die Abkürzung *IO* bezeichnet. Bei diesen Fällen erfolgt die Grenzschichtabsaugung durch eine Auslassenebene nach dem Düsenaustritt, die tatsächlich ein Teil der Strömung absaugt. Bei diesen Simulationen wurden die Eigenschaften des Windkanals so genau wie möglich nachgebildet.

Diese zwei Varianten werden in Vergleich gestellt. Auf dem Bild 4.10 und Bild 4.11 ist links die *IO* Variante, rechts die Variante, bei der der Windkanal mitsimuliert wurde. Zuerst ist der Verlauf der Luftwiderstandsbeiwerte c_d , c_s , c_l abgebildet, das nächste Bild stellt die Momentenbeiwerte c_{M_x} , c_{M_y} , c_{M_z} dar.

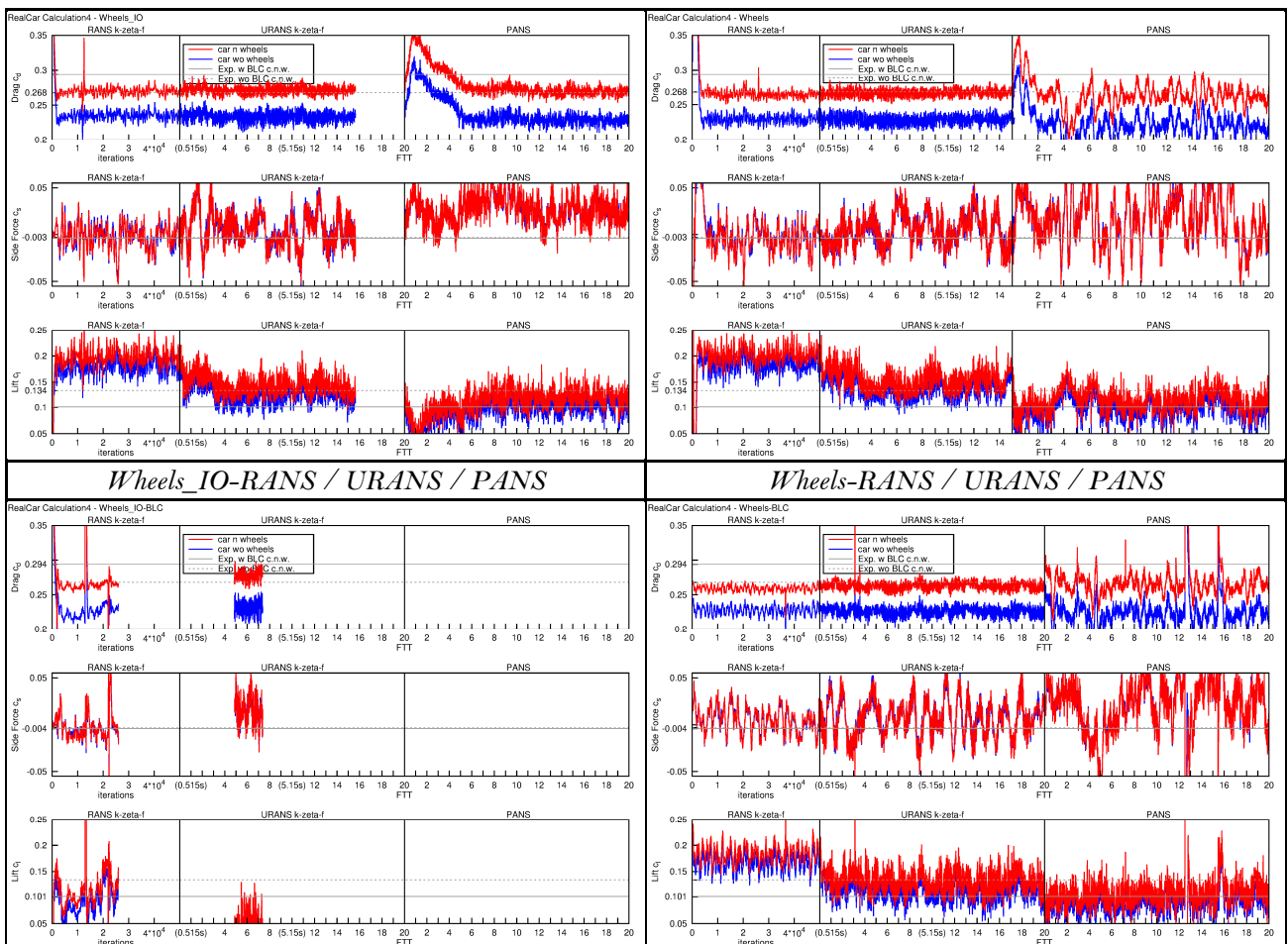


Bild 4.10: Verläufe des Luftwiderstands c_d , der Seitenkraft c_s , des Auftriebs c_l bei der rechteckigen Domäne und dem Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung BLC.

Bei den RANS Kalkulationen wurden 50000 Iterationen, bei den URANS und PANS 20 FTTs gerechnet. Das Endergebnis aus der RANS Simulation wird als Startfeld für die URANS Simulation verwendet. In gleicher Weise wird die PANS Simulation mit dem URANS Feld, lediglich ohne die zeitliche Information (*Restart without time information*), gestartet. Weil die Simulationen *Wheels_IO-BLC* schlechte Ergebnisse geliefert haben, wurden sie frühzeitig gestoppt. An den Verläufen von RANS, URANS und PANS ist deutlich wie bei den instationären Simulationen die Seitenkraft c_s eine größere Schwankung und Oszillation im Vergleich zu RANS aufweist. Die Periode mit der sie oszilliert ist sehr lang und die 20 berechneten FTT sind kaum ausreichend. Bei den PANS Simulationen, bei denen die turbulente Strukturen zum Teil aufgelöst werden, weisen die stärkeren Oszillationen auf zahlreiche Ablösungen von starken Wirbeln auf der Fahrzeugoberfläche hin.

Nächstes Merkmal ist eine kontinuierliche Absenkung des Auftriebes c_l von RANS über URANS zu PANS. Das PANS Verfahren kommt dem im Experiment gemessenen Auftrieb am nächsten.

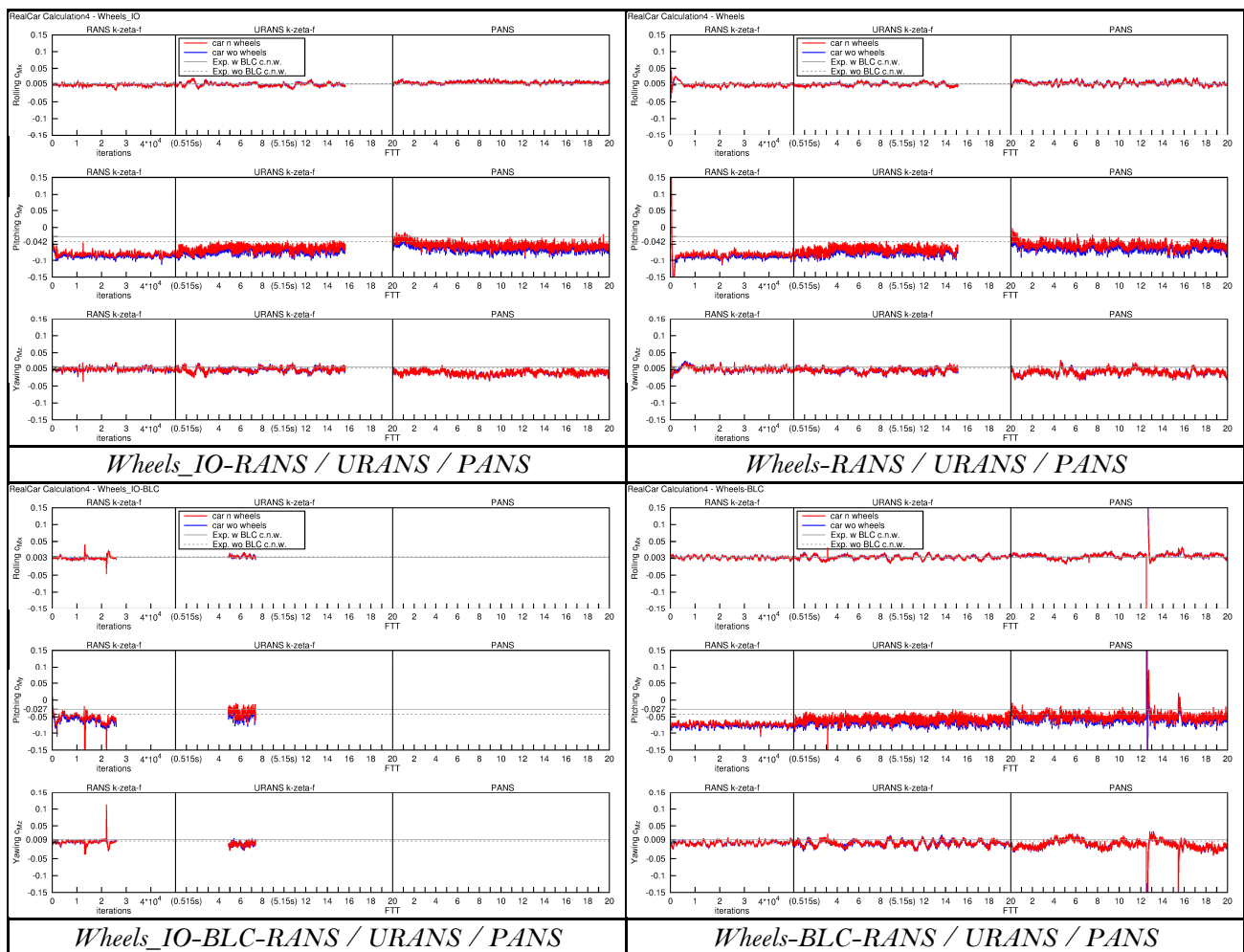


Bild 4.11: Verläufe des Rollmomentbeiwerts c_{M_x} , Nickmomentbeiwerts c_{M_y} , des Giermomentbeiwerts c_{M_z} bei der rechteckigen Domäne und dem Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung BLC.

Der Verlauf der Momentbeiwerte weist deutlich weniger Oszillationen auf. Der Trend der Verbesserung von RANS über URANS zu PANS verbleibt in den meisten Fällen. An manchen Stellen sind in dem Verlauf plötzliche Aussetzer zu sehen. Diese Störung kann nur bestimmte kartesische Komponente treffen. Die Ursache dafür liegt wahrscheinlich in der Berechnung der Kraftkomponenten auf der Fläche bei schlechten Zellen. Wenn es nach einem Neustart zum Vorschein kommt, weist es auf ein inkonsistentes *backup* File hin. Alle diese

fehlerhaften Werte wurden bei der Mittelung rausgefiltert. Die Strömungsvariablen in dem Volumengitter sind nicht mit dieser Störung betroffen.

Eine grafische Darstellung der Tabellen Tabelle 4.6 und Tabelle 4.7 stellen die Bilder Bild 4.12 und Bild 4.13 dar.

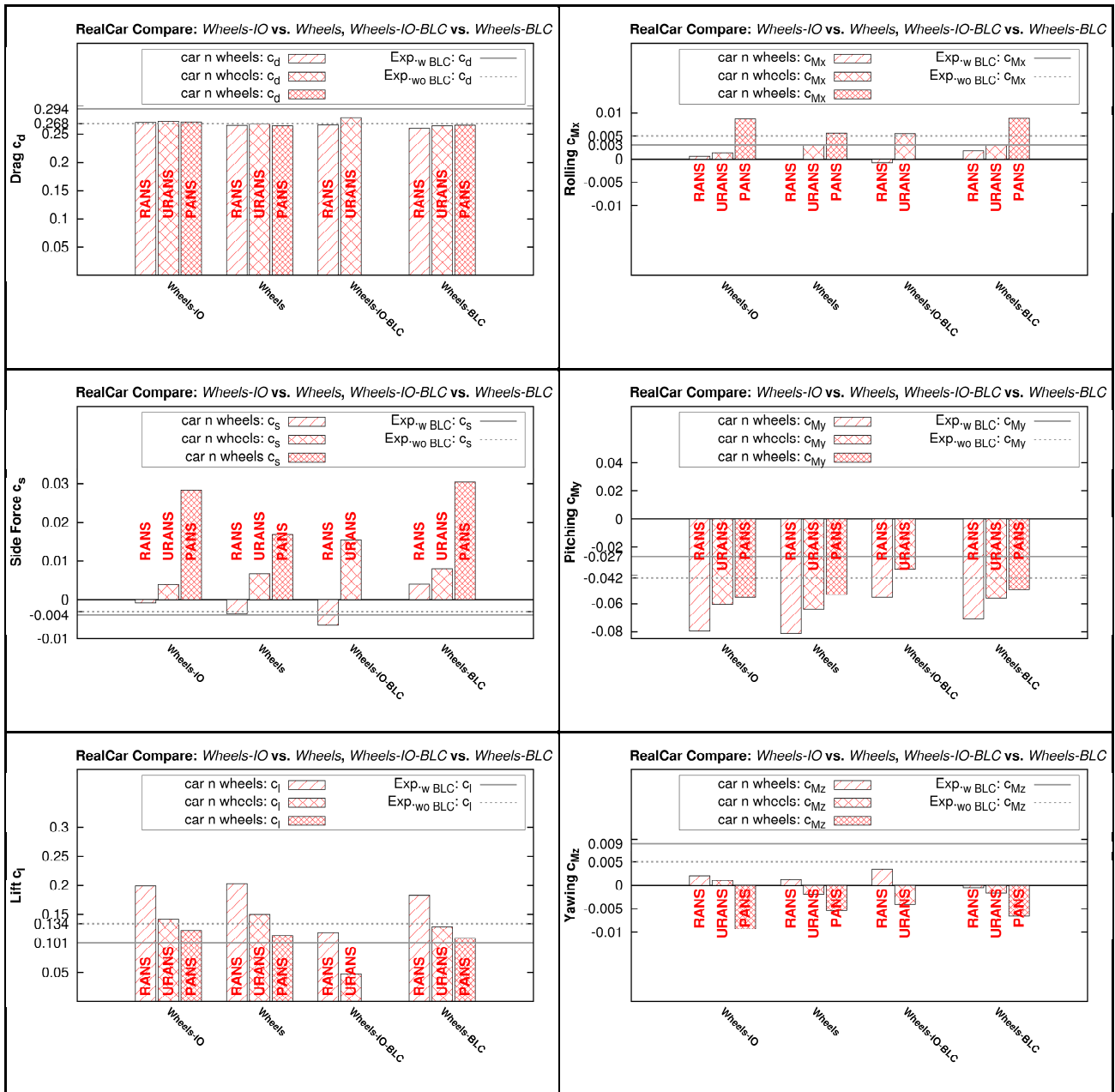


Bild 4.12: Histogramm des Luftwiderstands c_d , Seitenkraft c_s , Auftriebs c_l , des Roll- c_{M_x} , Nick- c_{M_y} und Giermomentbeiwerts c_{M_z} des *RealCar* mit Rädern bei der rechteckigen Domäne und dem Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung *BLC*.

Links sind die Luftwiderstandsbeiwerte und rechts die Momentenbeiwerte aufgetragen. In jedem Graf ist zuerst der Vergleich zwischen der rechteckigen Domäne *Wheels_IO* und dem nachgebauten Windkanal *Wheels* abgebildet; danach folgt ein Vergleich zwischen den Simulationen mit und ohne die Grenzschichtabsaugung *BLC*. Jeder Fall wurde durch das RANS, das URANS und das PANS Verfahren berechnet.

Der Luftwiderstand c_d wurde bei Simulationen ohne *BLC* gut getroffen. Dabei wird die Tendenz beobachtet, dass der Luftwiderstand c_d von RANS über URANS zu PANS steigt. Dies lässt sich damit erklären, dass die stationäre RANS Simulation nur eine statische Lösung wiedergibt und die instationären Wirbelstrukturen nicht richtig abbildet. Für eine richtige Abbildung der instationären Ablösungen auf dem Fahrzeugmodell ist eine instationäre URANS Simulation nötig. Sie bildet die auftretenden Wirbelstrukturen genauer ab; der

Luftwiderstand c_d steigt. Ein URANS Verfahren ist aber zu 100% modelliert. Als das genaueste Verfahren gilt das PANS Verfahren, bei dem die turbulenten Strukturen zum Teil ausgelöst werden. Dies trägt zu einer noch besseren Darstellung der Strömung bei. Der Luftwiderstand c_d berücksichtigt nur die x -Komponente der wirkenden Kraft; vereinfacht kann man sagen, dass er die Druckzustände vor und hinter dem Fahrzeugmodell, bzw. den Staupunkt und den Nachlauf beschreibt. In der Strömungsrichtung performen alle drei Verfahren ähnlich gut. Anders ist das aber bei den Simulationen mit Grenzschichtabsaugung. Wenn die Grenzschicht nach dem Düsenaustritt abgesaugt wird, entsteht dabei ein Druckgradient. Zugleich trifft das Fahrzeug in den unteren Partien eine Strömung mit einer höheren Geschwindigkeit. Dadurch erhöht sich auch der Luftwiderstand c_d . Dies kann durch diese Simulationen nicht wiedergegeben werden. An dieser Stelle sollte man erwähnen, dass der Fall *Wheels_IO-BLC* eine extreme Situation darstellt. Der ganze Boden ist als *slip wall* definiert; dadurch bildet sich auf der kompletten Fahrbahn keine Grenzschicht. Auch bei dieser extremen Situation, die bei einer experimentellen Untersuchung im Windkanal mit *BLC* nie vorkommt, lässt sich der Luftwiderstand c_d nicht ausreichend erhöhen. Das weist auf die allgemeine Schwierigkeit hin, diese im Windkanal angewandte Methode durch CFD zu reproduzieren.

Bei der Seitenkraft c_s zeigen die experimentellen Messwerte eine Abweichung von Null. Bei einer symmetrischen Karosserie wird dies wahrscheinlich durch die Führung des Abgassystems verursacht, wodurch die Strömung auf der Fahrzeugunterseite umgeleitet wird. Wie schon erwähnt wurde, wird eine instationäre Umströmung durch RANS zu einer stationären Lösung gezwungen. Somit erreicht die Seitenkraft c_s bei einer RANS Simulation nur niedrige Werte. Wie schon früher diskutiert wurde, müssen die höheren Werte der Seitenkraft c_s bei den instationären URANS und PANS Simulationen keine Abweichung von den experimentellen Werten heißen. Für die Oszillation der Seitenkraft c_s sind vor allem die periodischen Ablösungen an der A- und C-Säulen und im Totwasser verantwortlich. Diese Mechanismen zeichnen sich durch eine große Periode aus, für die die simulierten 20 *FTT* kaum ausreichend sind.

Der signifikante Vorteil der wirbelaufgelösten PANS Methode zeigt sich vor allem bei dem Auftrieb c_l . Hier ist PANS in der Lage den Auftrieb c_l so zu senken, dass er mit den experimentell gemessenen Daten gut übereinstimmt. Es ist ein bekannter Fakt, dass die RANS Simulation bei einer Fahrzeugumströmung den Auftrieb c_l sogar um 100% überschätzen kann. Das ist in dieser Arbeit auch der Fall. Die Verwendung von *slip wall* in dem *Wheels_IO-BLC* Case senkt dramatisch den Auftrieb c_l und wird als ungeeignet betrachtet. Sie hatte als Ziel den Luftwiderstand c_d maximal zu erhöhen. Die URANS Simulation überschätzt bei anderen Fällen immer leicht den Auftrieb c_l . Schließlich ist dem PANS gelungen, den Auftrieb c_l bei beiden Fällen, mit und ohne *BLC*, zufriedenstellend abzubilden. Auf den Auftrieb c_l hat die Grenzschichtabsaugung durch eine Auslassebene folgende Wirkung: Die Strömung zwischen der Fahrbahn und der Fahrzeugunterseite wird dadurch beschleunigt, was zu einer kleinen Differenz zwischen der Strömungsgeschwindigkeit oberhalb und unterhalb des Fahrzeugmodells führt und sich in einem niedrigeren Auftrieb c_l widerspiegelt. Die hier angewandte Methode der Grenzschichtabsaugung wurde dadurch verifiziert und im nächsten Kapitel weiter verwendet.

Weil das Rollmoment c_{M_x} sehr kleine Werte aufweist, ist es äußerst schwierig es genau wiederzugeben. Als erfolgreich anzusehen ist die Tatsache, dass das Rollmoment c_{M_x} bei allen relevanten Simulationen mit dem richtigen Vorzeichen wiedergegeben wird. Das negative Vorzeichen bei dem Giermoment c_{M_z} lässt sich auf die verkehrte Seitenkraft c_s zurückführen. Das Nickmoment c_{M_y} ist direkt mit dem Auftrieb c_l verbunden; deswegen zeigt PANS erneut die beste Übereinstimmung mit den experimentellen Daten.

Mittels des Nickmoments c_{M_y} lässt sich aus dem Auftrieb c_l der Auftrieb an der Vorderachse $c_{l(f)}$ und der Auftrieb an der Hinterachse $c_{l(r)}$ wie folgt bestimmen:

$$c_{l(f)} = \frac{c_l}{2} + c_{M_y} \quad , \quad c_{l(r)} = \frac{c_l}{2} - c_{M_y} \quad (4.14)$$

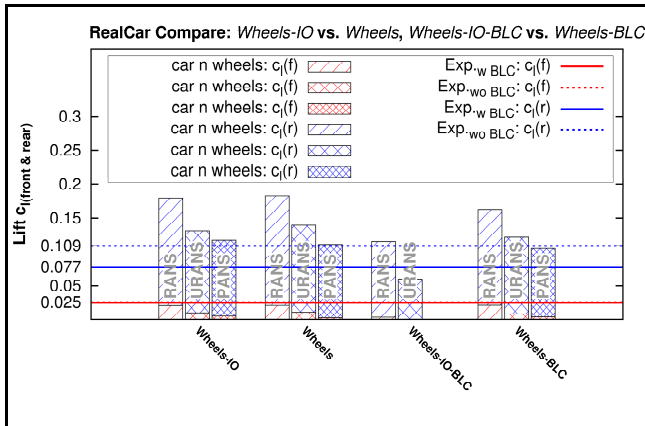


Bild 4.13: Histogramm des Auftriebs c_l auf der Vorder- und Hinterachse des *RealCar* mit Rädern bei der rechteckigen Domäne und dem Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung *BLC*.

Weil das Nickmoment c_{M_y} mit einer schlechteren Genauigkeit als der Auftrieb c_l wiedergegeben wurde, treten bei den Auftrieben der Vorderachse $c_{l(f)}$ und der Hinterachse $c_{l(r)}$ größere Abweichungen von den experimentellen Daten auf. Aus dem Bild 4.13 ist aber sichtbar, dass die Grenzschichtabsaugung *BLC* nur auf den Hinterachsenauftrieb $c_{l(r)}$ einen Einfluss hat. Der Vorderachsenauftrieb $c_{l(f)}$ bleibt im Vergleich zum Experiment, bei dem er unter anderem durch den Druckgradient erhöht wird, fast unverändert.

Als Nächstes wird die Druckverteilung mit den experimentellen Daten verglichen. Bei der experimentellen Untersuchung, die durch Schrefl (Schrefl 2008) durchgeführt wurde, wurde der Druck an 54 Stellen durch Flachdrucksonden mit einem 64-Kanal Druckmessmodul ESP-64 HD gemessen. Dabei wurde nur die Druckdifferenz ermittelt. Bei der Umrechnung auf den Druckbeiwert c_p nimmt Schrefl (Schrefl 2008) den Druck im Punkt 33 als Referenzdruck. Der Punkt 33 befindet sich zwar im Bug in der Mitte, muss aber nicht zwangsläufig den Staupunkt darstellen. Der Referenzdruck in dem Druckmessmodul ist leider nicht bekannt. Die Druckmesspunkte sind an den Seitenwänden in drei *z*-Linien, auf der Motorhaube, der Frontscheibe, dem Dach, der Heckscheibe und auf dem Kofferraumdeckel in zwei *y*-Linien und auf dem Unterboden in einer *y*-Zenterlinie verteilt. Auf dem Bugzenter befindet sich ein und auf dem Heck zwei Punkte. Wegen Dokumentationsmangel sind die *x*-Positionen der Punkte 39, 46 (Heckscheibe), 50, 51 (Unterboden die ersten zwei von links) nicht bekannt. Diese Positionen wurden aus vorhandenen Skizzen abgeschätzt. Diese zwei Ungenauigkeiten beeinflussen den Vergleich zwischen Simulationen und den experimentell gewonnenen Daten negativ.

Bei der grafischen Darstellung werden die Simulationen durch den Druckverlauf auf der Ober- und Unterseite miteinander verglichen. Weil die Abweichungen zwischen einzelnen Simulationen deutlich kleinere Werte aufweisen als der Verlauf selbst, kommt es zu einer Überlappung der Linien oder Punkte. Aus diesem Grund wird nur die Differenz einer Simulation zur anderen dargestellt.

Vorherige Ergebnisse haben gezeigt, dass die beste Übereinstimmung mit experimentellen Daten bei den Luftwiderstandsbeiwerten der PANS Simulationen liegt. Aus diesem Grund wird der Druckverlauf nur zwischen den PANS Simulationen verglichen.

Auf dem Bild 4.14 links ist der Vergleich zwischen der rechteckigen Domäne *Wheels_IO-PANS* und dem nachgebauten Windkanal *Wheels-PANS* dargestellt. Die Referenzsimulation *Wheels-PANS* ist durch Linien abgebildet. Die Differenz der darauf bezogenen Simulation *Wheels_IO-PANS* wird als eine Fläche dargestellt. Je breiter die Fläche ist, desto größer der Unterschied. Auf der Fahrzeugoberseite ist bei der Simulation *Wheels_IO-PANS* der Druck auf dem Dach und dem Kofferraumdeckel kleiner. Auf der Heckscheibe und auf dem Heck ist er dann größer. Der Druck auf dem Unterboden weist nach der Vorderachse überwiegend kleinere Werte auf. Laut der Bernoulli-Gleichung deutet der kleinere Druck bei dem Case *Wheels_IO-PANS* auf eine schnellere Strömung um das Fahrzeugmodell hin. Weil der Druck überwiegend in der hinteren Partie sinkt, ist das wiederum mit einem größeren Luftwiderstand c_d verbunden. Die Ursache für den größeren Auftrieb c_l ist aus dieser Abbildung nicht deutlich zu sehen. Zusätzlich sind die Druckunterschiede zwischen der linken und der rechten Oberseite sichtbar. Das weist auf eine asymmetrische Wirbelentstehung auf der Heckscheibe und im Totwasser hin.

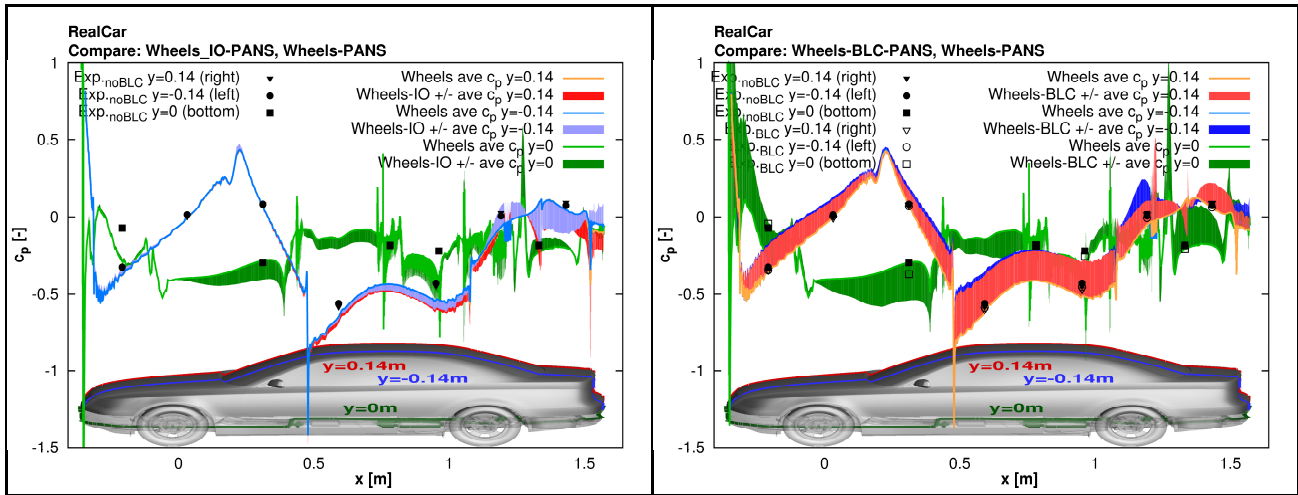
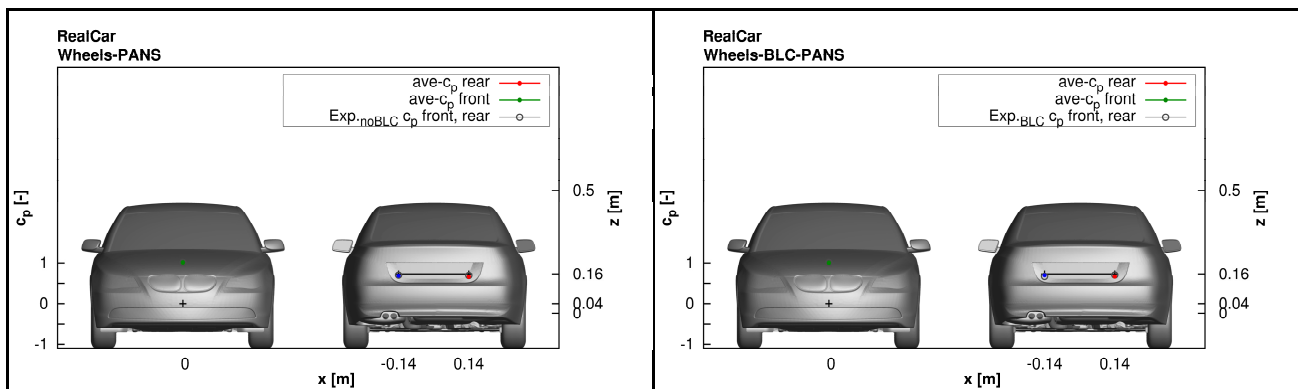


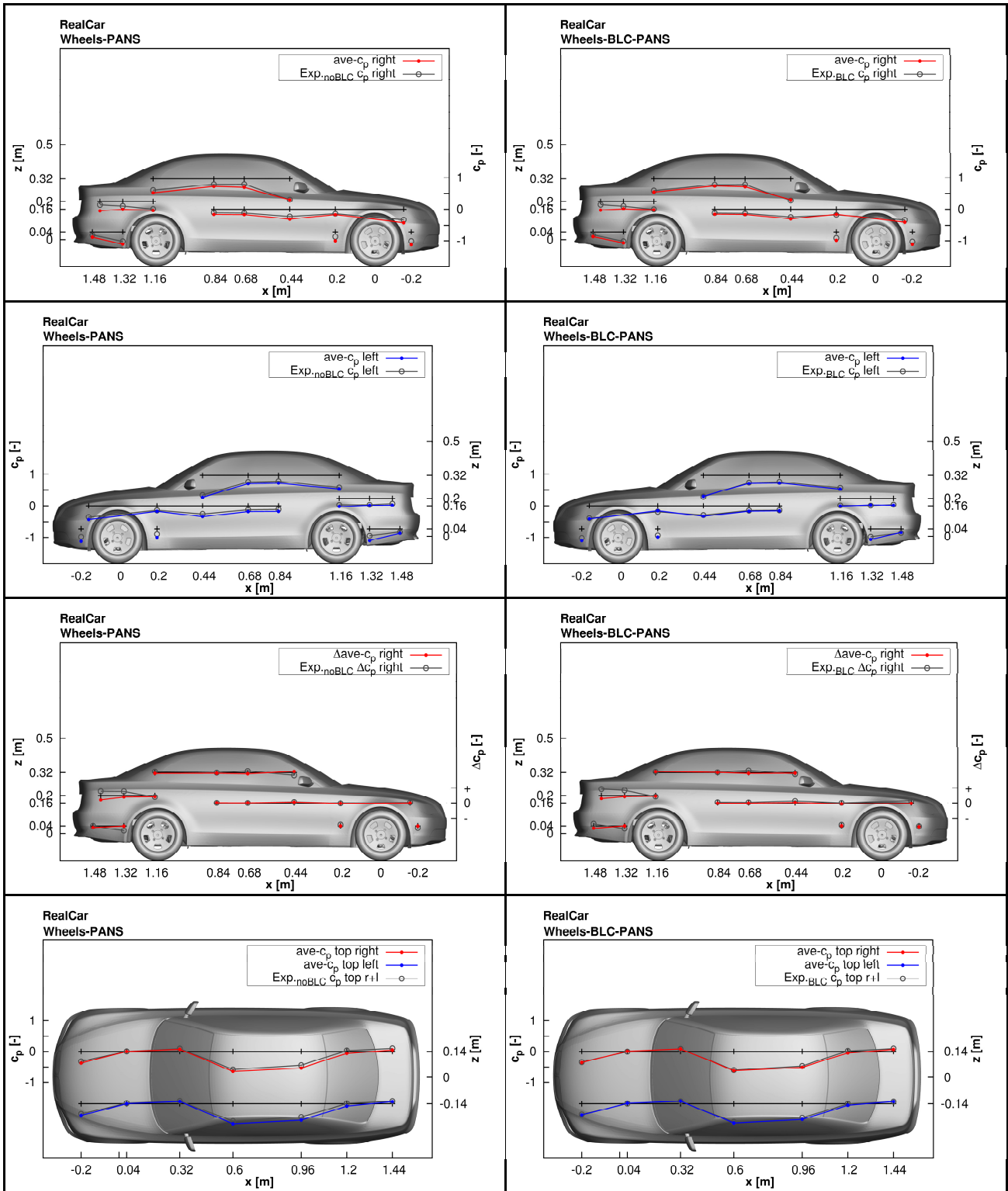
Bild 4.14: Differenz des gemittelten Druckbeiwerts c_p auf der Ober- und Unterseite zwischen der rechteckigen Domäne und dem Windkanalnachbau (links) und bei ein- und ausgeschalteter Grenzschichtabsaugung BLC (rechts).

Das Bild 4.14 zeigt rechts dann den Vergleich zwischen ein- und ausgeschalteter Grenzschichtabsaugung BLC in dem nachgebauten Windkanal. Die Druckdifferenz bei dem Case *Wheels-BLC-PANS* ist wieder auf die Referenzsimulation *Wheels-PANS* bezogen. Bei der Simulation *Wheels-BLC-PANS* ist der Druck auf der Oberseite durchgehend größer. Auf der Unterseite mit Ausnahme der Reserveradmulde überwiegend kleiner. Die Gleichmäßigkeit erklärt den ähnlichen Luftwiderstand c_d . Die Strömung ist oberhalb langsamer und unterhalb schneller, was zu einem kleineren Auftrieb c_l führt.

Aus den experimentellen Daten ist deutlich, dass der Druck auf der Oberseite durch die Grenzschichtabsaugung BLC sinkt; die Strömung wird also schneller. Dieses Verhalten kann die Simulation nicht wiedergeben; sie weist auf der Oberseite einen Druckanstieg auf. Auf der Unterseite auf dem Frontdiffusor und in dem Getriebetunnel stimmt die Tendenz zwischen Simulation und Experiment überein. Auf dem Differential und der Reserveradmulde kommt es wieder zu Abweichungen. Im Experiment wird die Strömung durch die Grenzschichtabsaugung BLC sowohl oberhalb als auch unterhalb deutlich beschleunigt, was die Modellierung der Grenzschichtabsaugung in der Simulation nicht wiedergeben kann.

In Bezug auf das Experiment wird weiterhin die aus- und eingeschaltete Grenzschichtabsaugung BLC betrachtet und dabei die Simulationen *Wheels-PANS* und *Wheels-BLC-PANS* verglichen.





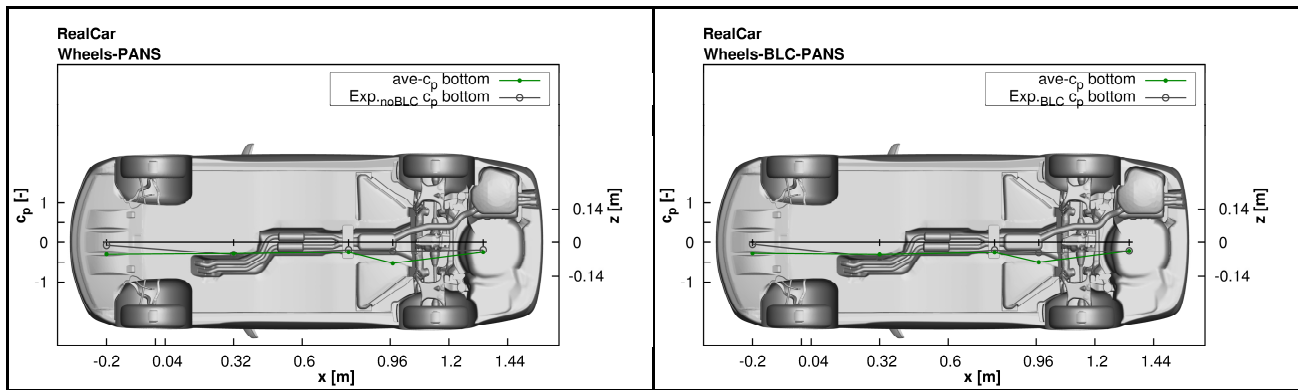


Bild 4.15: Werte des gemittelten Druckbeiwerts c_p in Messpunkten am Bug, am Heck, auf der linken und rechten Seite, auf der Ober- und Unterseite im Windkanalnachbau mit ein- und ausgeschalteter Grenzschichtabsaugung *BLC*.

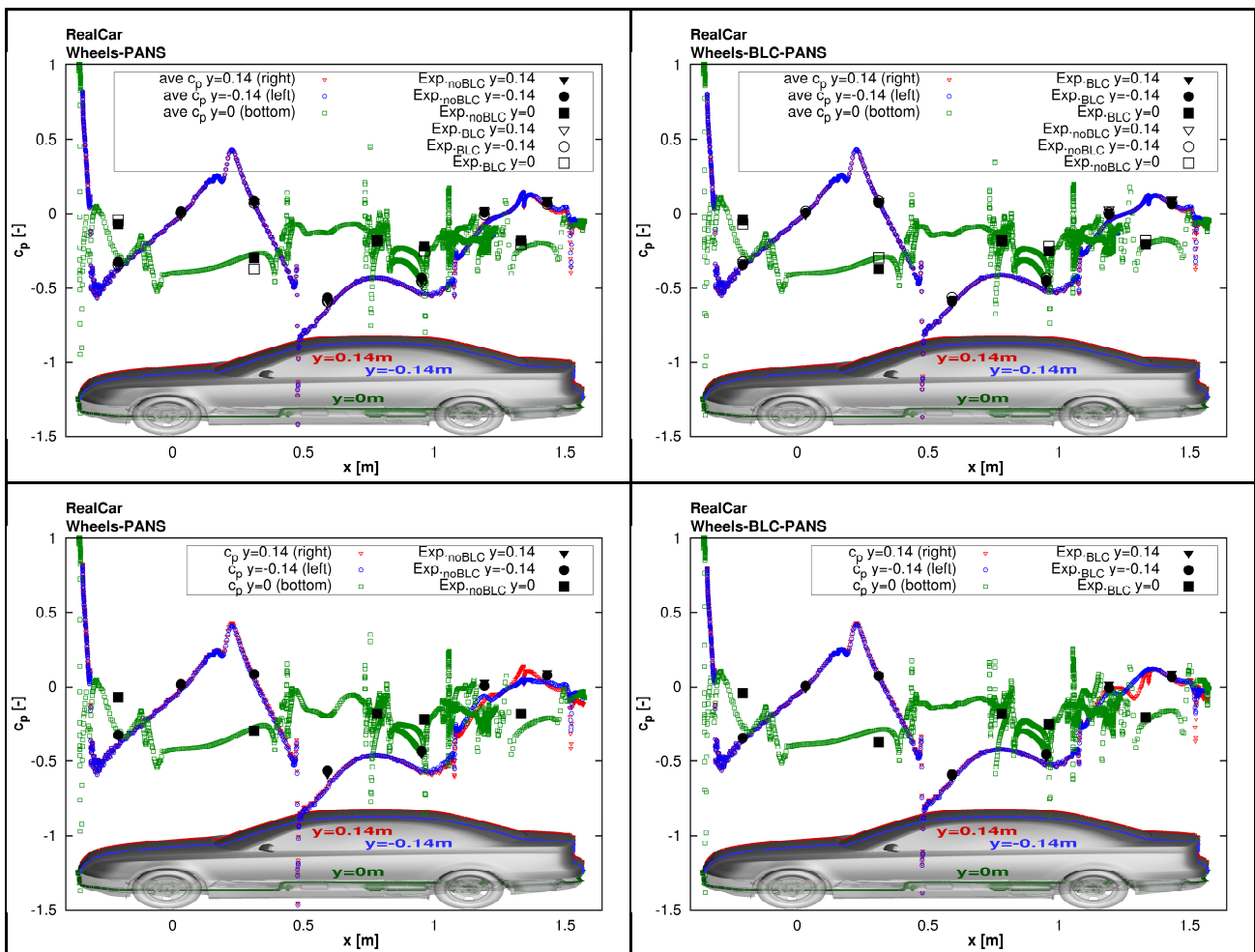


Bild 4.16: Verlauf des gemittelten und augenblicklichen Druckbeiwerts c_p auf der Ober- und Unterseite im Windkanalnachbau mit ein- und ausgeschalteter Grenzschichtabsaugung *BLC*.

Auf dem Bild 4.16 sind alle 54 Messpunkte auf der Fahrzeugoberfläche abgebildet und die Simulationsergebnisse wurden mit den experimentellen Daten verglichen. Schwarze, durch Linien verbundene Kreuze zeigen die Messstellen bzw. Messebenen und gleichzeitig den Wert $c_p = 0$. Die experimentellen Ergebnisse sind grau dargestellt und die Daten aus der Simulation farbig. In der ersten Reihe ist die Front und das Heck abgebildet. Auf der Frontschürze befindet sich in der Mitte in einer Höhe von $z = 0,04\text{m}$ ein Messpunkt. Dieser Punkt liegt in dem Staupunktbereich. Zu diesem Punkt ist auch die Skala bezogen. Im Staupunkt ist der Druckbeiwert $c_p = 1$. Auf dem Heck in der Kennzeichenmulde liegen in einer Höhe $z = 0,16\text{m}$ symmetrisch in zwei Ebenen $y = -0,16\text{m}$ und $y = 0,16\text{m}$ zwei Messpunkte. Diese Punkte liegen im

Totwasser und bei beiden Simulationen zeigen sie einen leichten Unterdruck. Die Übereinstimmung mit den experimentellen Daten ist gut. Die zweite Reihe zeigt die rechte Fahrzeugseite. Auf den Seiten sind die Messpunkte in vier horizontalen Ebenen $z = 0,04m$, $z = 0,16m$, $z = 0,2m$, $z = 0,32m$, verteilt. Eine leichte Abweichung von den Messwerten findet in den Bereichen statt, bei denen es zu einer größeren Verwirbelung kommt. Diese Stellen befinden sich im Heckbereich vor und hinter den Rädern. Die Simulation *Wheels-BLC-PANS* trifft die Messdaten etwas besser. Die Druckverteilung auf der linken Seite, die in der dritten Reihe zu sehen ist, trifft die Messdaten noch besser als auf der rechten Seite. Die Abweichungen im Heckbereich sind hier nicht vorhanden. Auch hier zeigt die Simulation *Wheels-BLC-PANS* eine bessere Übereinstimmung mit dem Experiment. Auf beiden Seiten herrscht ein Unterdruck. Anschließend wird in der vierten Reihe anhand der rechten Seite der Druckunterschied zwischen der rechten und der linken Seite aufgetragen. Eine positive Tendenz zeigt, dass der Druck auf der rechten Seite größer als auf der linken Seite ist. Ein negatives Vorzeichen stellt einen kleineren Druck rechts bzw. einen größeren Druck links dar. Hier sieht man wieder Abweichungen in dem Heckbereich. Das umgekehrte Vorzeichen zum Experiment ist höchstwahrscheinlich mit der umgekehrten Seitenkraft c_s verbunden. Die fünfte Reihe zeigt die Druckverteilung in zwei symmetrischen Ebenen $y = -0,16m$ und $y = 0,16m$ auf der Fahrzeugoberseite. Die Unterdrücke weisen darauf hin, dass die Strömung auf der Motorhaube und auf dem Dach beschleunigt wird. Eine fast perfekte Übereinstimmung mit dem Experiment zeigt die Simulation *Wheels-BLC-PANS*. Die letzte Reihe zeigt dann die Druckverteilung auf dem Fahrzeugunterboden. Hier sind die größten Abweichungen auf dem Frontdiffusor und auf der Abgasanlage zu sehen. Ein Grund dafür kann der Unterschied zwischen dem experimentell untersuchten und dem simulierten Fahrzeugmodell sein. Der Messpunkt auf dem Mittelschalldämpfer liegt an einer Krümmung an der die Strömung beschleunigt und der Druck verringert wird. Das scheint bei dem Experiment nicht der Fall zu sein. Die Grenzschichtabsaugung im Experiment beschleunigt die Strömung auf der Unterseite; die Simulation kann dieses Phänomen nicht ganz wiedergeben.

Das nächste Bild 4.16 zeigt einen kompletten Druckverlauf der Simulationen auf den zwei symmetrischen Ebenen $y = -0,16m$ und $y = 0,16m$ auf der Oberseite und auf der Zentralebene $y = 0m$ auf der Unterseite. Zuerst wird der gemittelte Druckbeiwert $ave\ c_p$ aus der Simulation im Vergleich mit dem Experiment gezeigt. Überwiegend wird eine gute Übereinstimmung geliefert. Anhand dieser Darstellung lässt sich die Umströmung wie folgt beschreiben: Am Bug entsteht ein Staupunkt, die Strömung wird gestoppt, gefolgt von einem Druckanstieg. An der konkaven Abrundung der Motorhaube beschleunigt die Strömung, es entsteht ein Unterdruck. Entlang der Motorhaube nimmt der Druck wieder zu. Im Windlauf ist der Druckanstieg so steil, dass die Strömung ihm nicht mehr folgen kann und löst sich ab. An der Windschutzscheibe wird die Strömung wieder angelegt und wieder beschleunigt, der Druck nimmt ab. Auf dem Übergangsradius zum Dach entsteht die größte Unterdruckspitze. Auf dem Dach mit einem großen Radius verlangsamt sich die Strömung, der Druck steigt. Auf dem Übergang zur Heckscheibe verkleinert sich der Radius, wodurch die Strömung wieder beschleunigt wird und der Druck sinkt. An der Heckscheibe kommt es zu einem steilen Druckanstieg, der mit einer Ablösung verbunden ist. Am Übergang von Heckscheibe zum Kofferraumdeckel bildet sich eine Ablöseblase. Die Geschwindigkeit ist dort niedrig, der Druck hoch. Die Strömung wird an dem Kofferraumdeckel wieder angelegt und an dem Heckspoiler löst sie sich endgültig ab. Der Fahrzeugunterboden verfügt über viele Details und Anbauteile, deswegen ist der Strömungsverlauf mit zahlreichen Störungen und Ablösungen verbunden. Die Strömung ist somit an der Unterseite langsamer und der Druck höher als auf der Oberseite, was auch der Grund für einen positiven Auftrieb c_l ist.

Aufgrund einer reibungsbehafteten Strömung kommt es zu einer Ablösung im hinteren Teil des Fahrzeugmodells. Der Druck kommt nicht wieder auf $c_p = 1$; er ist hinten kleiner als vorne, was den Luftwiderstand c_d zur Folge hat.

Als nächstes sieht man auf dem Bild 4.16 (unten) den nichtgemittelten, augenblicklichen Druckverlauf. Auf der Oberseite sind im Heckbereich größere Druckunterschiede zwischen der linken und der rechten Seite im Vergleich zu dem gemittelten Fall zu sehen. An der Heckscheibe und an dem Kofferraumdeckel kommt es zu mehreren Druckanstiegen, die auf dem gemittelten Bild nicht sichtbar sind und auf Ablösungen hindeuten.

Zuletzt wird ein Blick auf die Druckverteilung auf der gesamten Fahrzeugoberfläche geworfen. Auf dem Bild 4.17 sind außer dem Staupunkt an der Frontschürze weitere Hochdruckgebiete im Windlauf, an den Seitenspiegeln, an den vorderen Rädern und Staullippen erkennbar. Unterdruckgebiete, die eine Beschleunigung der Strömung bedeuten, entstehen an kleinen Radien, die sich z.B. an dem Übergang zur Motorhaube und zum Dach, an Scheinwerfern, A-Säulen, Seitenspiegeln, an Reifen, an dem Frontdiffusor, usw. befinden. Bei der

Simulation *Wheels-BLC-PANS* lässt sich etwas größerer Unterdruck im Bereich der Vorderachse als bei der Simulation *Wheels-PANS* beobachten. Das trägt zu dem kleineren Auftrieb bei.

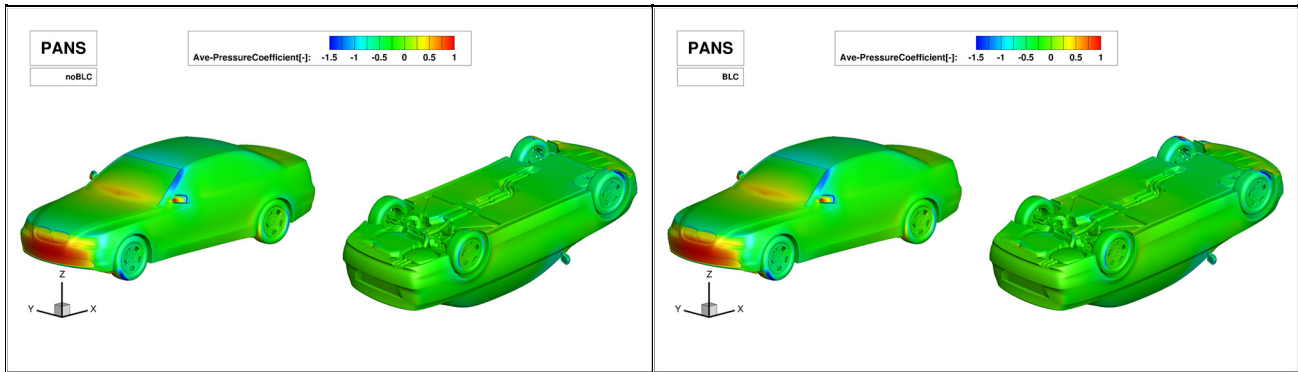


Bild 4.17: Vergleich des gemittelten Druckbeiwerts c_p auf der Oberfläche des *RealCar* im Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung *BLC*.

Der kleinere Auftrieb bei der Simulation *Wheels-BLC-PANS* wird mittels des Bild 4.18 erklärt. Ein Schnitt in der mittleren y -Ebene, gefärbt durch eine gemittelte Geschwindigkeitskomponente u zeigt, dass die Geschwindigkeit unter dem Fahrzeugmodell bei der Grenzschichtabsaugung, Simulation *Wheels-BLC-PANS* (rechts), größer ist. Die Strömung ist in diesem Fall im Heckbereich mehr nach oben gekrümmt. Dadurch wird der Impulsverlust aus der Umströmung der Oberseite kompensiert, was zu dem niedrigeren Auftrieb an der Hinterachse führt.

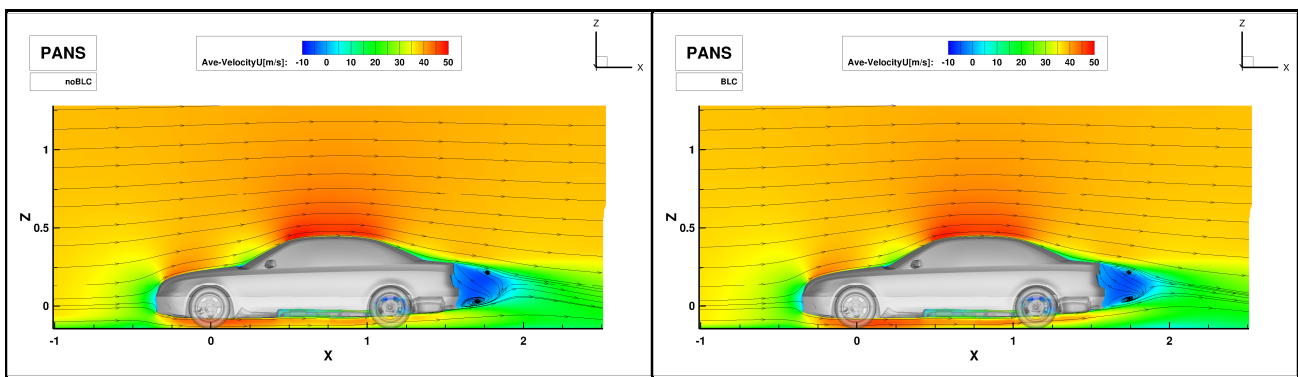


Bild 4.18: Vergleich der gemittelten U -Geschwindigkeit im Längsmittelschnitt im Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung *BLC*.

Anhand einer *PANS* Simulation ohne Grenzschichtabsaugung werden die Unterschiede der Fahrzeugumströmung in einer rechteckigen Domäne und in einem nachgebauten Windkanal analysiert. Das Bild 4.19 zeigt einen Schnitt in der mittleren y -Ebene. Geplottet werden die gemittelte Geschwindigkeit und Stromlinien. Im Fall der rechteckigen Domäne wird durchgehend eine konstante Geschwindigkeit in dem Raum beobachtet. Im Gegensatz dazu hat die Düse in dem nachgebauten Windkanal einen kleineren Querschnitt als der Kollektor. Das Geschwindigkeitsprofil dehnt sich aus; die Anfangsgeschwindigkeit bleibt über die Höhe nicht konstant. Hinter dem Fahrzeugmodell im Nachlauf entsteht eine deutlich größere Grenzschicht als in dem ersten Fall.

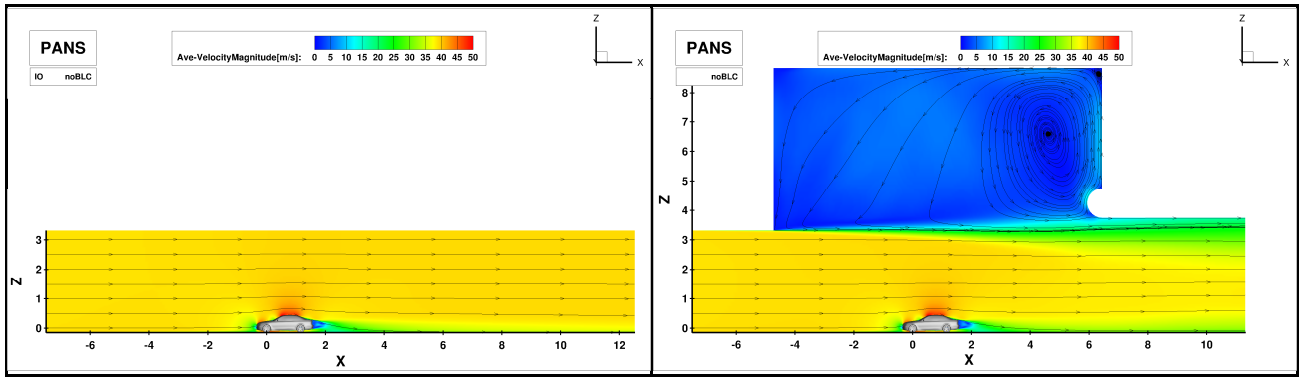


Bild 4.19: Vergleich der gemittelten Geschwindigkeit im Längsmittelschnitt in der rechteckigen Domäne und im Windkanalnachbau ohne Grenzschichtabsaugung *BLC*.

Bild 4.20 zeigt die Situation in der horizontalen Ebene $z = 0,08m$ (über die Vorderachse wo sich der Ursprung des Koordinatensystems befindet). Bei einem konstanten Volumenstrom und einem größeren Durchmesser verkleinert sich die Geschwindigkeit. Der Übergang findet im Plenum statt. Die Strömung, die dort das Fahrzeugmodell trifft, wird ein kleines bisschen langsamer. Sie dehnt sich in die Seiten und in die Höhe aus, was auch der Grund für den kleineren Luftwiderstand c_d und den Auftrieb c_l ist.

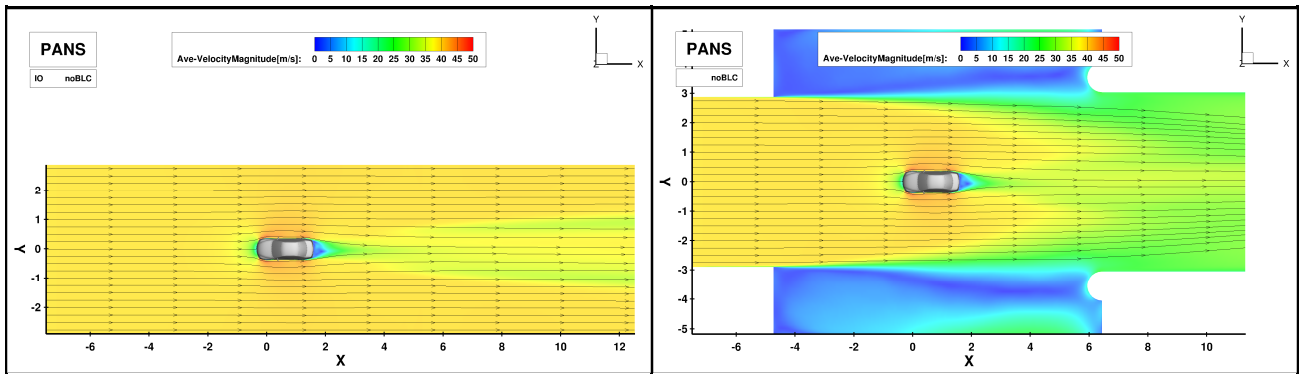


Bild 4.20: Vergleich der gemittelten Geschwindigkeit in der horizontalen Ebene $z = 0,08m$ in der rechteckigen Domäne und im Windkanalnachbau ohne Grenzschichtabsaugung *BLC*.

Dieses Kapitel wird sich weiter mit der Strömung, die um das Fahrzeugmodell entsteht, beschäftigen. Dazu wurde unter Bezugnahme auf folgende Kapitel das Case mit der Grenzschichtabsaugung *Wheels-BLC* ausgewählt. Dabei werden die drei Simulationsverfahren RANS, URANS und PANS miteinander verglichen und diskutiert.

Bevor die drei Simulationsverfahren näher untersucht werden, muss zuerst ein Bezug zum Experiment hergestellt werden. Weil keine Strömungsbilder von Schrefl (Schrefl 2008) vorhanden sind, wurde eine Untersuchung von Ahmed und Baumert (Hucho 2005: 197, 203 und 213), Bild 2.16 genommen. In dieser experimentellen Untersuchung ist die Situation der Stufenheck-Umströmung relevant. Für einen sinnvollen Vergleich wurden die Positionen der x -Ebenen für die Auswertung der Simulationen übernommen. Sie sind in einem dimensionslosen Abstand $x/l = 0,04; 0,24; 0,48; 0,96$ nach dem Fahrzeugheck eingeordnet (vgl. Hucho 2005: 213). In diesem Fall bedeutet das:

- Fahrzeuglänge: $l = 1,936m$
- $x = 0,04 \cdot l = 0,04 \cdot 1,936 = 0,07744m$ hinter dem Fahrzeugmodell. In Bezug auf das Koordinatensystem dann:
- $x_c = (0,04) \cdot l + 1,5855m = 1,6629m$
- $x_c = (0,24) = 2,05023m ; (0,48) = 2,51497m ; (0,96) = 3,44445m$.

Auf dem Bild 4.21 sind alle vier x -Ebenen und die Ebene $y = 0,1m$ abgebildet und durch die gemittelte Geschwindigkeit gefärbt. Bei den RANS und URANS Simulationen sind durch die Stromlinien mehrere Wirbelkerne auf den Ebenen sichtbar als bei dem Experiment. Grund dafür kann die Mittelung über eine nicht

ausreichende Anzahl von Proben sein. Fokussiert man sich auf die erste Ebene, die sich noch im Totwasser befindet, stellt man bei der RANS Simulation sogar zwei Wirbelpaare fest. Dies entspricht nicht unbedingt der Realität sondern wird durch das Verfahren verursacht. Stationäres RANS Verfahren modelliert komplett alle Variablen und nähert sich einer stationären zeitunabhängigen konvergierten Lösung an. Auf den fernen Ebenen sind bei allen drei Simulationen die Spuren von zwei gegenläufigen Längswirbeln. Der rechte Längswirbel rotiert im Uhrzeigesinn, was mit dem Experiment übereinstimmt. Die RANS und URANS Simulationen zeigen einen elliptischen vertikal gedehnten Längswirbel, was von der experimentellen Beobachtung abweicht. Im Gegenteil dazu zeigt PANS einen elliptischen horizontal gedehnten Längswirbel, was dem Experiment näher kommt. Bei der PANS Simulation sind die Längswirbel aber etwas tiefer positioniert.

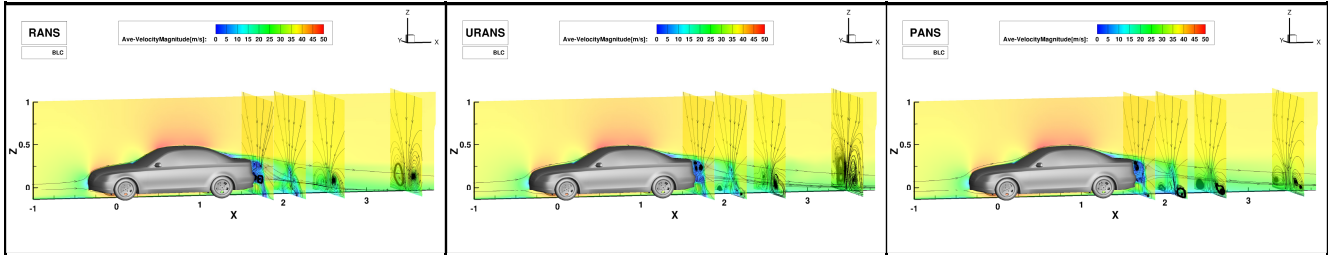


Bild 4.21: Vergleich der Längswirbel im Nachlauf des *RealCar* bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung *BLC*.

Als nächstes wird das Totwasser detailliert diskutiert. Weil keine experimentellen Daten vorhanden sind, wird bei der Bewertung auf die Theorie zurückgegriffen. Das Bild 4.22 zeigt einen Schnitt in den Ebenen $y = 0,1m$ und $z = 0,08m$. Ihre Positionen wurden anhand der PANS Simulation so gewählt, damit sie den Ringwirbel ungefähr in der Mitte schneiden und seine Spuren gut sichtbar sind. Geplottet wird die gemittelte Geschwindigkeitskomponente u , damit die Rückströmung im Totwasser sichtbar wird. Auf dem Horizontalschnitt ist eine Grenzschicht entlang der Fahrzeugseite sichtbar. Dort ist der Reibungswiderstand dominant. Am Fahrzeugheck ist der Druckanstieg so hoch, dass sich die Strömung ablöst und eine Rezirkulationszone bildet, die man als Totwasser bezeichnet. Hier spielt der Druckwiderstand eine überwiegende Rolle. Im Totwasser sind auf dieser Ebene zwei gegenläufig drehende Wirbel zu sehen. Zwischen diesen Wirbeln entsteht eine Rückströmung. Hier performen alle drei Verfahren ähnlich gut; die Wirbelgröße ist ähnlich und der Sattelpunkt stimmt überein, obwohl bei der PANS Simulation die Wirbel weniger symmetrisch sind. Diese zwei Wirbel sind Spuren des Ringwirbels, der ebenso in einer vertikalen Ebene sichtbar sein sollte.

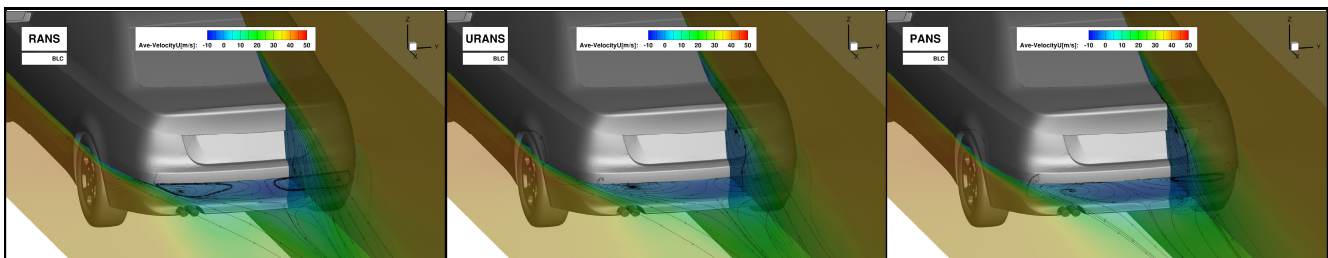


Bild 4.22: Vergleich der Totwässer des *RealCar* bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung *BLC*.

Auf dem vertikalen Schnitt ist zuerst eine Ablösung der Strömung an der Heckscheibe sichtbar. An dem Kofferraumdeckel legt sie sich wieder an und später an dem Heckspoiler löst sie sich diesmal endgültig ab. Die zwei gegenläufig drehende Wirbel im Totwasser sind nur bei der PANS Simulation nachgebildet. Bei RANS und URANS ist nur ein Wirbelkern zu erkennen.

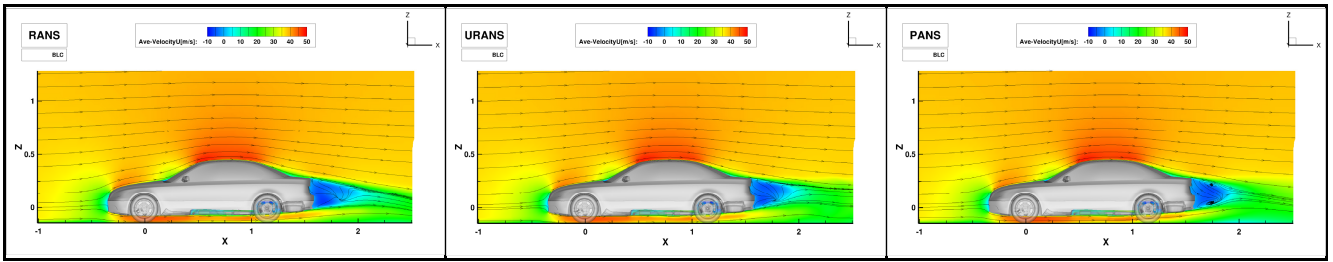


Bild 4.23a: Vergleich der gemittelten U -Geschwindigkeit im Längsmittelschnitt bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung BLC .

Das Bild 4.23a zeigt einen Längsmittelschnitt, durch die gemittelte Geschwindigkeitskomponente u , gefärbt. Die Rezirkulationszone ist von RANS über URANS bis zu PANS kürzer. Die Darstellung der Spuren des Ringwirbels durch Stromlinien gelingt wieder nur bei der PANS Simulation. Die negative Geschwindigkeit deutet aber trotzdem auf zwei Rückströmungsgebiete bzw. Wirbel bei den RANS und URANS Simulationen hin. Der Ringwirbel ist nur nach einer zeitlichen Mittelung sichtbar.

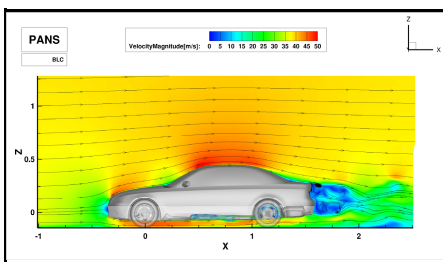


Bild 4.24b: Augenblickliche Geschwindigkeit im Längsmittelschnitt bei PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung BLC .

Bei einer Momentaufnahme formieren sich die Wirbel stochastisch. Die Mittelung aus wenigen Proben bei RANS und URANS kann deswegen der Grund sein, dass der Ringwirbel nicht deutlicher dargestellt wird. Aus dem zeitabhängigen Verlauf gesehen, löst sich ein Haarnadelwirbel, der in der Ablösung an der Heckscheibe entsteht, periodisch ab und schwimmt nach hinten ab. Das Bild 4.23b versucht durch die augenblickliche Geschwindigkeit und Stromlinien dieses Verhalten nachzuweisen. Wenn die Ablöseblase pulsiert, verursacht sie damit einen oszillierenden Auftrieb.

Die Strömung wird weiterhin anhand der PANS Simulation beschrieben: auf den Bildern Bild 4.25, Bild 4.26 und dem Bild 4.27 (rechts). Das erste Bild zeigt die Strömung im zeitlichen Mittel. An schrägen Kanten der A- und C-Säulen bilden sich Längswirbel, die parallel zu der Ablösekannte verlaufen. Im Nachlauf von den Seitenspiegeln bilden sich ebenso stationäre Wirbeltüten. Die auf dem Dach abgelöste Strömung bildet auf der Heckscheibe neben dem C-Säule-Wirbelpaar ein zweites Längswirbelpaar.

Die Umströmung der Räder ist mit zahlreichen Ablösungen verbunden. Bei dem Vorderrad bildet sich ein Hufeisenwirbel.

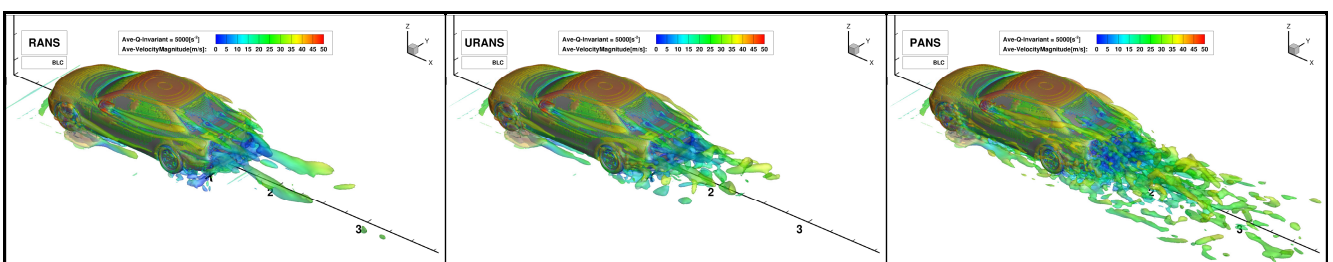


Bild 4.25: Vergleich der Strukturen des gemittelten Q -Kriteriums durch gemittelte Geschwindigkeit gefüllt bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung BLC .

Für den Vergleich der drei Verfahren wurde das Q -Kriterium, das das lokale Gleichgewicht zwischen Rotation und Scherung beschreibt, genommen. Dazu wurde eine Iso-Fläche mit dem Wert $Q = 5000s^{-2}$ ausgewählt. Die stationäre RANS Simulation kann im zeitlichen Mittel nur grobe und stärkste Verwirbelungen wiedergeben. Dank der zeitlichen Diskretisierung entstehen mehrere zeitabhängige Wirbel (Bild 4.26), die dann zeitlich gemittelt feinere Strukturen bilden. Bei beiden Simulationen sind alle Variablen zu 100% modelliert. Im Vergleich dazu ist PANS eine wirbelauflösende Methode. Die Strömung wird teils direkt aufgelöst und teils durch ein URANS Modell modelliert. Dadurch sind auch sehr feine Strukturen sichtbar.

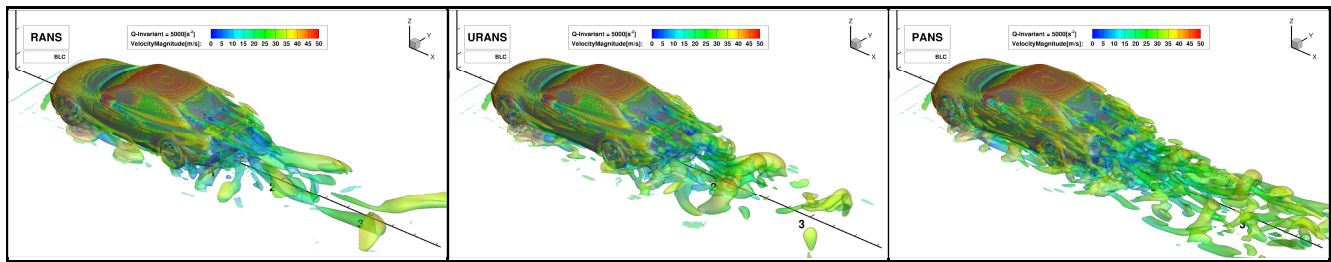


Bild 4.26: Vergleich der Strukturen des augenblicklichen Q-Kriteriums durch augenblickliche Geschwindigkeit gefüllt bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung *BLC*.

In dem zeitabhängigen Verlauf auf dem Bild 4.26 ist bei PANS sogar der Ringwirbel deutlich, der sich periodisch als spiralförmige Wirbel aus dem Totwasser ablöst, die dann in den Nachlauf abschwimmen. Die periodischen und instationären Ablösungen an den Kanten des Fahrzeugmodells, die quer zur Strömung liegen, lassen sich durch das augenblickliche Bild besser beobachten.

Das nächste Bild 4.27 zeigt zwei Iso-Flächen von der Wirbelstärke mit den Werten $\omega = 300s^{-1}$ und $\omega = 500s^{-1}$. Die Wirbelstärke beschreibt das Maß der drehenden Bewegung eines Fluids. Dadurch lassen sich auch einige Strömungsverhältnisse um das Fahrzeugmodell visualisieren. Man kann wieder einige von oben beschriebenen Wirbeln identifizieren und die Simulationsverfahren durch die Auflösung der Strukturen voneinander unterscheiden. Der Nachteil ist, dass die Wirbelstärke an der Wand ihr Maximum hat; deswegen eignet sie sich weniger für die Wirbelidentifikation.

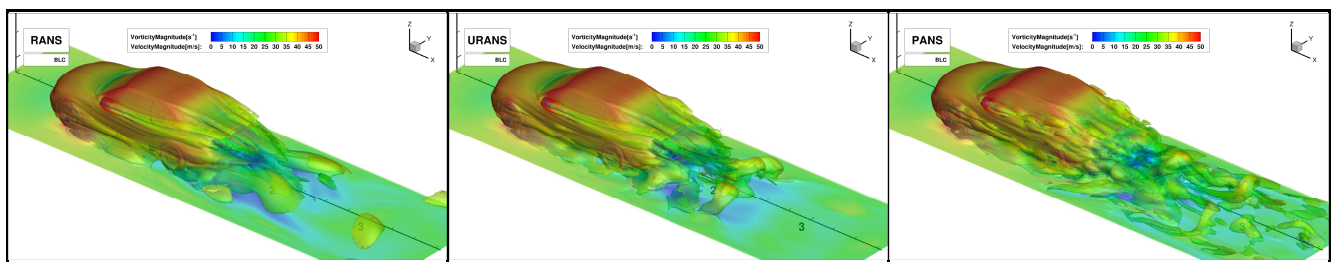


Bild 4.27: Vergleich der Strukturen der augenblicklichen Wirbelstärke durch augenblickliche Geschwindigkeit gefüllt bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung *BLC*.

Weiterhin wird in diesem Kapitel über relevante turbulente Größen berichtet.

Der Grad der Turbulenz wird durch die turbulente kinetische Energie und durch die Dissipationsrate beschrieben. Die Qualität der Berechnung wird anhand der Werte des dimensionslosen Wandabstands y^+ , der CFL-Zahl, des delta/eta-Verhältnisses und bei PANS zusätzlich durch den f_k -Parameter festgestellt.

Das Bild 4.28 zeigt die Verteilung der nichtgemittelten turbulenten kinetischen Energie in Fahrzeugnähe. Bei den RANS und URANS Simulation deutet die erhöhte turbulente kinetische Energie auf zahlreiche Verwirbelungen hinter dem Fahrzeugmodell im Totwasser und im Nachlauf hin. Bei PANS handelt es sich um eine gesamte turbulente kinetische Energie, die aus einem aufgelösten und einem modellierten Anteil besteht.

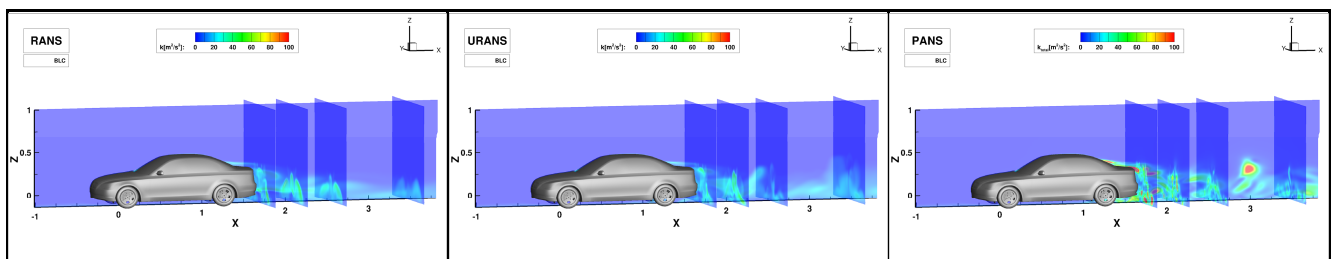


Bild 4.28a: Vergleich der augenblicklichen turbulenten kinetischen Energie in der Fahrzeugnähe bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung *BLC*.

Die deutlich größeren Werte hinter dem Fahrzeugmodell stellen mehrere energietragende Wirbelstrukturen dar. Auch feinere Kleinstrukturen kann PANS im Gegensatz zum RANS und URANS wiedergeben. Die zeitlich gemittelte Situation, siehe Bild 4.27b, zeigt größere Werte der turbulenten kinetischen Energie nicht nur im Totwasser, sondern auch zwischen dem Fahrzeugmodell und der Fahrbahn. Sie baut sich aber in dem Nachlauf wieder langsam ab.

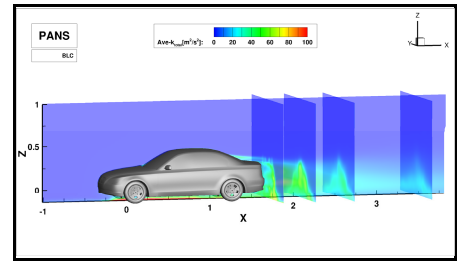


Bild 4.29b: Gemittelte turbulente kinetische Energie in der Fahrzeughöhe bei PANS Verfahren mit Grenzschichtabsaugung BLC.

Die Größe der Dissipationsrate ist wieder nur in Fahrzeughöhe relevant. Die Verteilung der Dissipationsrate verhält sich umgekehrt zu der Verteilung der turbulenten kinetischen Energie. Bild 4.30 zeigt bei den RANS und URANS Simulationen eine große Dissipation direkt hinter dem Fahrzeugmodell und unter der Hinterachse. Im Vergleich dazu beschränken sich die größeren Werte der Dissipation bei PANS nur auf den Bereich unter der Hinterachse und auf die Ablösung an der Heckscheibe. Durch die große Dissipation bei RANS und URANS zerfallen die Wirbel schneller. In Gegensatz dazu tragen bei der PANS Simulation die größeren Wirbel ihre turbulente kinetische Energie, leben dadurch länger und dissipieren dann langsamer.

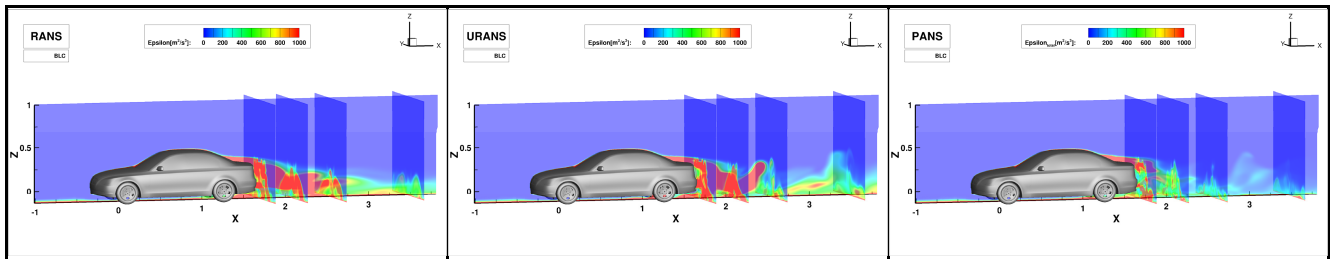


Bild 4.30: Vergleich der augenblicklichen Dissipationsrate in der Fahrzeughöhe bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung BLC.

Auf die turbulente kinetische Energie und die Dissipationsrate bezieht sich bei PANS auch der Parameter f_k . In diesem Fall ist nicht nur die Verteilung in der Fahrzeughöhe relevant, sondern auch in dem gesamten Rechengebiet. Das Bild 4.31 zeigt neben den Schnitten durch die Ebenen $y = 0,1m$ und $x/l = 0,04 ; 0,24 ; 0,48 ; 0,96$ auch einen Schnitt in der Ebene $y = 0m$ durch die gesamte Domäne. Zur Berechnung des in der ersten Zeile dargestellten f_k Parameters benutzt das PANS Modell folgende Gleichung:

$$f_k \geq \frac{1}{\sqrt{C_\mu}} \left(\frac{\Delta}{\Lambda} \right)^{2/3}, \quad \Lambda = \frac{k_{tot}^{3/2}}{\varepsilon_u} \quad (4.15)$$

Es handelt sich um ein Verhältnis zwischen der Gittergröße und der Längenskala, die als ein Verhältnis zwischen der gesamten turbulenten kinetischen Energie und der nichtaufgelösten Dissipationsrate definiert ist. So wird in jeder Zelle entschieden, zu welchem Teil die Strömung aufgelöst und simuliert wird. Der f_k Parameter variiert zwischen: $0 \leq f_k \leq 1$. Bei $f_k = 1$ wird die Strömung komplett modelliert (RANS Modus). Im Gegensatz dazu wird bei $f_k = 0$ die Strömung, genau wie bei DNS, direkt aufgelöst.

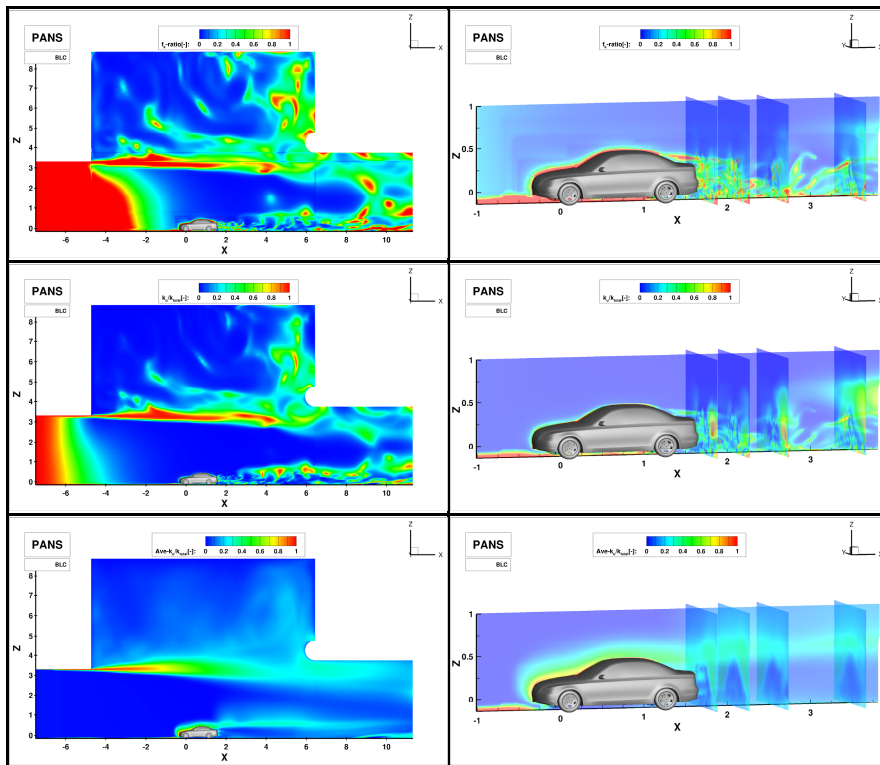


Bild 4.31: Vergleich des f_k Parameters mit dem Verhältnis k_u durch k_{tot} in der Fahrzeugnähe und in gesamter Domäne beim PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung *BLC*.

Aus der grafischen Darstellung ist deutlich, dass die Strömung direkt nach der Einlassebene komplett modelliert wird. Die Gittergröße ist größer als die Initialwerte von $k = 0,0001m^2s^{-2}$ und $\varepsilon = 0,0005m^2s^{-3}$. In der unmittelbaren Nähe von dem Fahrzeugmodell und der Fahrbahn bleibt die turbulente kinetische Energie noch klein. Sobald sich die Strömung ablöst und es zu einer Vermischung zwischen der separierten Scherschicht und der freien Strömung kommt, steigt der Turbulenzgrad und die Strömung wird im Nachlauf zum Teil direkt aufgelöst. f_k ist ein dynamischer Parameter, der in Zeit und Ort variiert. f_k lässt sich auch als ein Verhältnis von der nichtaufgelösten zu der gesamten turbulenten kinetischen Energie definieren:

$$f_k = \frac{k_u}{k_{tot}} \quad (4.16)$$

Die zweite Zeile auf dem Bild zeigt dieses Verhältnis ebenso in einer zeitunabhängigen Situation zum gleichen Zeitpunkt. Dadurch wird das Endergebnis eines bestimmten Zeitschrittes gezeigt. Auf der dritten Zeile ist das Verhältnis der nichtaufgelösten und gesamten turbulenten kinetischen Energie zeitlich gemittelt. Der f_k Parameter aus dem Verhältnis der nichtaufgelösten zur gesamten turbulenten kinetischen Energie sollte tendenziell kleiner als das f_k aus der Formulierung mit der Gittergröße und Längenskala sein, was auch der Fall ist. Das bedeutet dann, dass das Gitter durch seine Gittergröße das aus der Formulierung vorhergesagte f_k unterstützt. Das zeitlich gemittelte Verhältnis k_u durch k_{tot} zeigt das Endergebnis der Simulation, wo die Strömung modelliert und wo aufgelöst wurde.

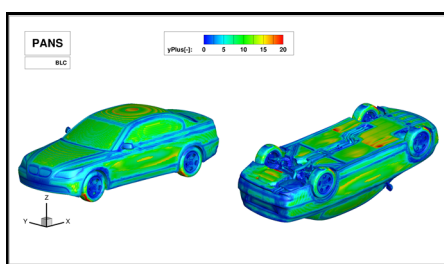


Bild 4.32: y^+ -Wert auf der Oberfläche des *RealCar* im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung *BLC*.

Das Bild 4.32 zeigt die Werte des dimensionslosen Wandabstands y^+ an der Fahrzeugoberfläche. Aus der Formulierung $y^+ = \frac{\rho \bar{u}_\tau y}{\mu}$ folgt, dass der dimensionslose Wandabstand y^+ an Stellen mit höherer Geschwindigkeit und bei größeren Zellen sein Maximum erreicht. Hier beobachtete Höchstwerte befinden sich im Bereich von $y^+ \approx 20$. An vielen Stellen ist das Gitter sehr fein und das $y^+ < 5$ ist. Damit liegt der erste wandnahe Zellmittelpunkt in der viskosen Unterschicht und die Strömungsvariablen könnten bis zur Wand direkt integriert werden. Überwiegend sind an der Fahrzeugoberfläche Werte von $y^+ \approx 10$ vorhanden. Das heißt, dass der erste Zellmittelpunkt in der Übergangsschicht liegt. Für die hier angewandte hybride Wandfunktion stellt dies kein Problem dar; sie verbindet die Integration bis zur Wand in der viskosen Unterschicht mit der Standardwandfunktion in dem voll turbulenten Gebiet. In der Übergangsschicht wird dann durch eine exponentielle Blendingfunktion zwischen viskosem und voll turbulentem Gebiet geblendet. Wichtig ist es, dass die y^+ Werte nicht zu hoch sind.

Das nächste Bild 4.33 zeigt die räumliche Verteilung der CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) Zahl.

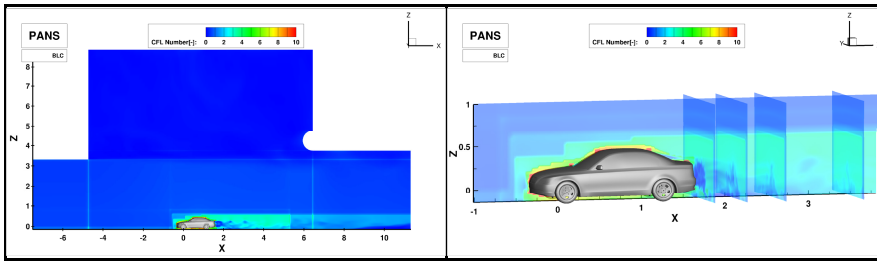


Bild 4.33: CFL-Zahl in der Fahrzeugnähe und in gesamter Domäne beim PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung *BLC*.

Die *delta/eta* Kennzahl auf dem Bild 4.34 zeigt, zu welchem Teil das Gitter die kleinsten Wirbelstrukturen (Kolmogorov-Längenskala) auflösen kann.

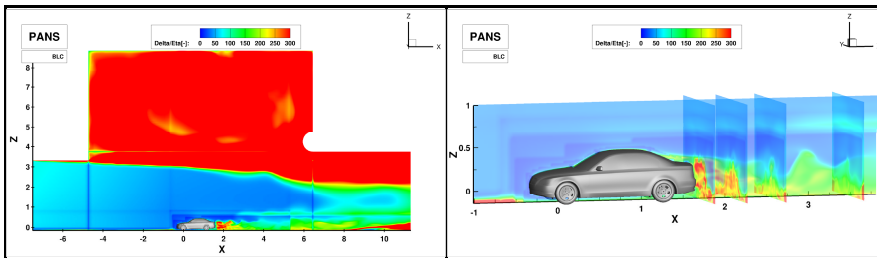


Bild 4.34: *delta/eta* Kennzahl in der Fahrzeugnähe und in gesamter Domäne beim PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit Grenzschichtabsaugung *BLC*.

als akzeptabel gesehen.

4.2.1.3.1. Verifizierung des Windkanalgitters

In diesem Kapitel werden die Messergebnisse aus dem leeren BMW Windkanal mit den Simulationsergebnissen aus seinem Nachbau verglichen. Dieser Windkanal ist „Göttinger“ Bauart, bei der die Luft mittels eines Gebläses in einem geschlossenen Kreislauf zirkuliert. Der Nachbau besteht aus einer Düse, einer Messstrecke, einem Plenum und einem Kollektor mit Auffangtrichter. Die Düse hat ein Kontraktionsverhältnis $\kappa = A_S/A_N = 1$. Der Düsen Eintritt A_S ist gleich dem Düsenaustritt A_N , $A_S = A_N = 5,77m \cdot 3,47m = 20,022m^2$. Die Messstrecke wird durch die Querschnittsfläche $A_N = 20,022m^2$, die von der Düse übernommen wird, und durch die Länge $L = 11,16m$ definiert. Das Verhältnis zwischen der Länge L und dem hydraulischen Durchmesser der Düse $D_N = 5,05m$ wird als die dimensionslose Länge $\Lambda = L/D_N = 11,16/5,05 = 2,21$ bezeichnet. Das Verhältnis der Querschnittsflächen von dem Kollektor $A_C = 6,09m \cdot 3,9 = 23,751m^2$ und der Düse A_N wird als $\Omega = A_C/A_N = 23,751/20,022 = 1,186$ bezeichnet. Schließlich wird als K das Querschnittsverhältnis vom Plenum $A_P = 10,35m \cdot 9m = 93,15m^2$ zum Strahlquerschnitt A_N bezeichnet: $K = A_P/A_N = 93,15/20,022 = 4,65$.

Die Versperrung φ stellt das Verhältnis der Projektionsfläche des Fahrzeuges A zur Querschnittsfläche A_N dar. Für das Fahrzeugmodell gilt: $\varphi = A/A_N = 0,351/20,022 = 0,018$. Da die Versperrung $\varphi < 0,1$ ist, ist die kinematische Ähnlichkeit zu einer freien Strömung gewährleistet.

Jeder Windkanal mit Freistrahlmessstrecke hat seinen spezifischen Druckverlauf. Der statische Druck entlang der offenen Messstrecke ist nicht konstant. Der statische Druck nimmt in der Düse ab. Bei einer dimensionslosen Länge $\Lambda \approx 2$ entsteht in der Mitte der Drehscheibe ein Druckanstieg, was auch hier der Fall ist. Dieser positiver Druckgradient und das Verhältnis Ω mit der dimensionslosen Länge Λ haben einen Einfluss auf den gemessenen Widerstand. Der Druckverlauf wird anhand des Druckkoeffizienten c_p zwischen dem Experiment und der

Aus der Definition $CFL = \frac{u\Delta t}{\Delta x}$ ist deutlich, dass die CFL-Zahl in kleinen Zellen mit höherer Geschwindigkeit am größten wird. Diese Bereiche stellen die fein vernetzten Kanten und Krümmungen auf der Motorhaube, dem Dach, dem Heckspoiler und auf dem Frontdiffusor dar. Dort erreicht lokal die CFL-Zahl einen Wert von $CFL \approx 10$. In der fein

vernetzten *FameHEXA* Domäne wird $CFL \approx 2$. Im Rest des Rechengebietes ist $CFL < 1$. Die Hauptströmung bleibt also zwischen zwei Zeitschritten innerhalb einer Zelle. Die hier verwendete implizite Zeitsdiskretisierung erlaubt auch Werte von $CFL > 1$. Die Stabilität der Berechnung ist durch die höheren Werte nicht beeinträchtigt.

Die Formulierung $\frac{\delta}{\eta} = \frac{(\Delta vol)^{1/3}}{(\frac{v^3}{\epsilon})^{1/4}}$ ist ein Verhältnis der Gittergröße zur Längenskala. Bei LES ist ein Wert von $\frac{\delta}{\eta} < 30$ erlaubt. Bei diesem hybriden Turbulenzmodell hat diese Kennzahl eher einen informativen Charakter. Die Werte von $\frac{\delta}{\eta} \approx 100$ in dem Nachlauf sind

Simulationen in den zwei Ebenen $z = 0,3m$ und $z = 0,6m$ auf dem Bild 4.35 verglichen. Dabei wurde bei den Simulationen der Referenzdruck in der Mitte der Drehscheibe in einer Höhe von $z = 0,5m$ entnommen.

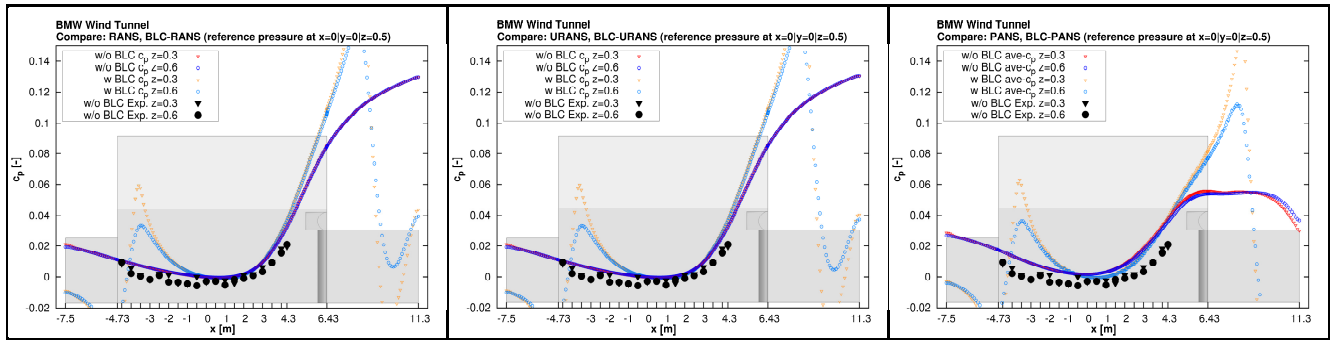


Bild 4.35: Vergleich des Druckverlaufs in leerer Messstrecke bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung *BLC*.

Das Bild 4.35 vergleicht weiter zwischen RANS, URANS und PANS Simulationen sowie zwischen Simulationen mit und ohne die Grenzschichtabsaugung *BLC*. Alle drei Simulationen weisen einen ähnlichen wie oben beschriebenen Verlauf auf. An dieser Stelle ist wichtig zu erwähnen, dass bei den RANS und URANS Simulationen ohne *BLC* eine Randbedingung für die Auslassebene *outlet: Static Pressure, Pressure = 100000Pa* vorgegeben wurde, jedoch bei RANS und URANS mit *BLC* und bei PANS sowohl mit als auch ohne *BLC* die Randbedingung *outlet: Gradient = 0 – all variables* definiert wurde. Diese Auswirkung ist bei den RANS und URANS Simulationen ohne *BLC* deutlich. Dabei passt sich der Druck in der Domäne künstlich an den vordefinierten Druck an. Der Druckverlauf bei den beiden PANS Simulationen und den Simulationen RANS und URANS mit *BLC* nimmt einen natürlichen Charakter an. Aus diesem Grund wird für Berechnungen in den weiteren Kapiteln ausschließlich die Randbedingung an der Auslassebene *outlet: Gradient = 0 – all variables* benutzt.

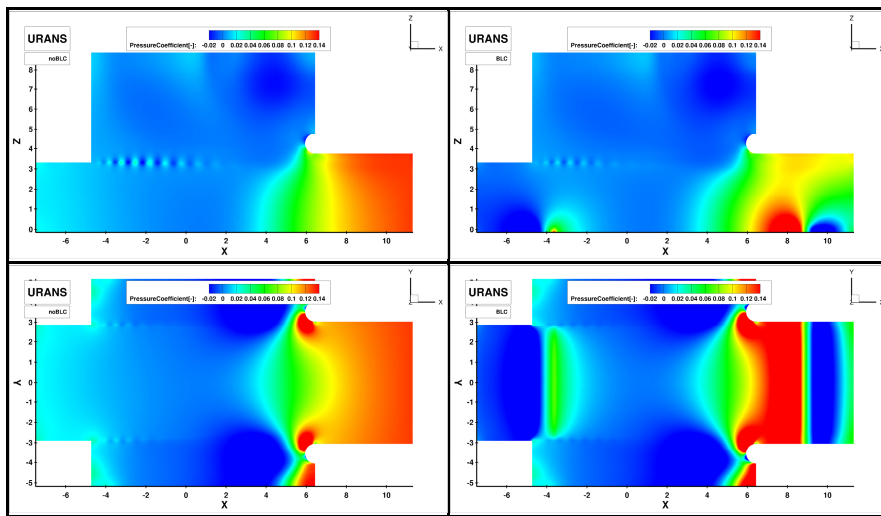


Bild 4.36: Vergleich des Druckbeiwerts c_p beim URANS Verfahren im leeren Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung *BLC*.

Bild 4.36 zeigt die Auswirkung der unterschiedlichen Randbedingungen an der Auslassebene bei einer URANS Simulation. Der Druck in der Domäne wird im Fall eines vordefinierten Wertes auf der Auslassebene in deren Nähe erhöht. Zusätzlich wird die Wirkung der Grenzschichtabsaugung auf das Druckfeld gezeigt. Die Grenzschicht wird mit einer Geschwindigkeit von $u_j = 2,7ms^{-1}$ nach dem Düsenaustritt senkrecht abgesaugt. Die Absaugung ist mit einem Druckgradienten verbunden. Im Kollektor wird die Luftmenge unter einem Winkel von 45° und

einer Geschwindigkeit von $u_j = 2,835ms^{-1}$ wieder zugefügt. An dieser Stelle tritt wieder ein Druckgradient auf.

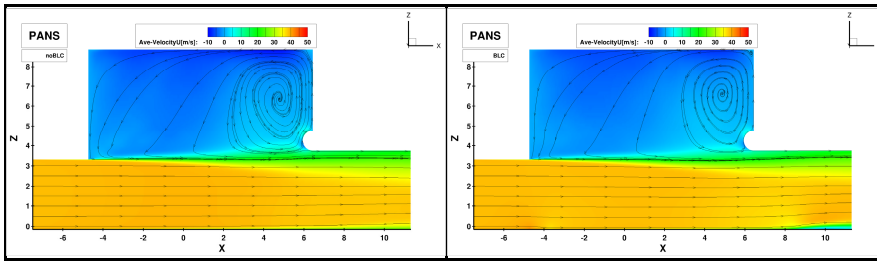


Bild 4.37: Vergleich der gemittelten U -Geschwindigkeit im Längsmittelschnitt im leeren Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung BLC .

Plenum kommt es zu einer Vermischung zwischen dem Freistrahle und der ruhenden Luft. Dabei wird der Strahlkern mit der gewünschten Geschwindigkeit U_∞ aufgebraucht. Der Freistrahle nimmt zwischen der Düse und dem Kollektor ein zusätzliches Luftvolumen auf. Die überschüssige Luft wird dann durch den gerundeten Einlauf des Kollektormundes in das Plenum abgeleitet.

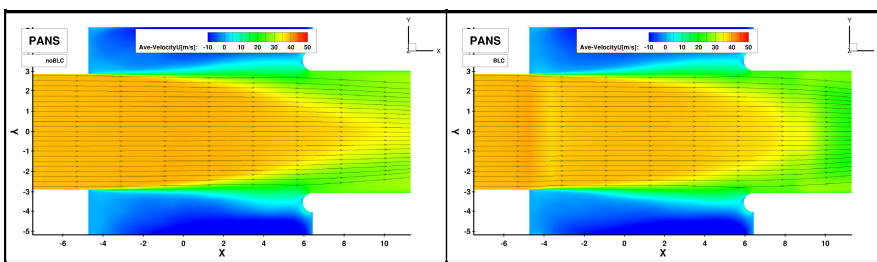


Bild 4.38: Vergleich der gemittelten U -Geschwindigkeit in der horizontalen Ebene $z = 0,08m$ im leeren Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung BLC .

Anhand der gemittelten Geschwindigkeitskomponente u , die auf den Bildern Bild 4.37 und Bild 4.38 gezeigt ist, wird der Strömungsverlauf im Windkanal mit offener Messstrecke beschrieben. In der Düse verteilt sich die Strömung gleichmäßig über den Austrittsquerschnitt, was mit einem niedrigen Turbulenzgrad verbunden ist. Im

Bei der Grenzschichtabsaugung BLC auf dem Bild 4.37 rechts kommt es zu einer Senkung der ersten Stromlinie. Die Grenzschicht ist dadurch kleiner. In der horizontalen Ebene $z = 0,08m$, die sich in Bodennähe befindet, zeigt die BLC eine Wirkung auf den Freistrahlkern.

Weil die Dicke der Grenzschicht mit der Länge der Düse steigt, wurde in dem nachgebildeten Windkanal die Länge der Düse aus einer Messung der Grenzschichtdicke bestimmt. Nach Schrefl (Schrefl 2008) wurde in einer Entfernung von $x = -2,5m$ bei ausgeschalteter Grenzschichtabsaugung BLC eine Grenzschichtdicke von $\delta(x) = 0,07m$ gemessen. Mit Hilfe einer empirischen Gleichung für Grenzschichtdicke bei einer ebenen Platte wurde der Ursprung der Grenzschicht und somit die Länge der Düse festgestellt:

$$x = \left(\frac{\delta(x)^5 U_\infty \rho}{0,37^5 \mu} \right)^{1/4} = \left(\frac{0,07^5 \cdot 38,89 \cdot 1,189}{0,37^5 \cdot 0,00001824} \right)^{1/4} = 4,979m \approx 5m \quad (4.16)$$

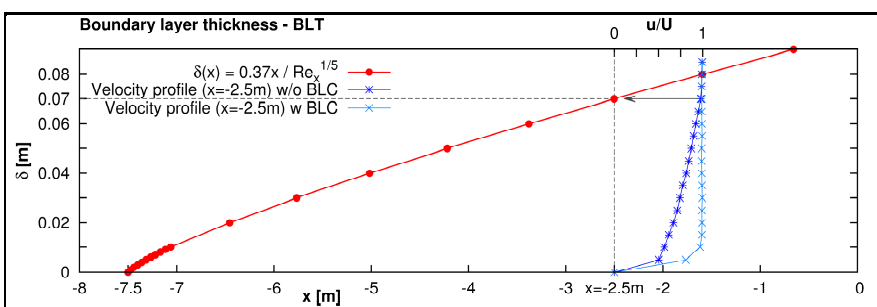


Bild 4.39: Bestimmung der Düsenlänge des Windkanalnachbaus nach empirischer Gleichung des Grenzschichtwachstums auf ebener Platte.

Grafisch ist diese Idee auf dem Bild 4.39 dargestellt. Rechts ist das von Schrefl (Schrefl 2008) gemessene Geschwindigkeitsprofil mit und ohne Grenzschichtabsaugung BLC dargestellt. In einer Höhe von $\delta = 0,07m$ wird die Geschwindigkeit U_∞ erreicht. Durch diese Höhe wird die Kurve des Grenzschichtwachstums gelegt und anschließend nach ihrem Ursprung gesucht. Daraus ergibt

sich dann der Anfang der Düse mit einer Einlassebene in einer Entfernung von $x = -7,5m$.

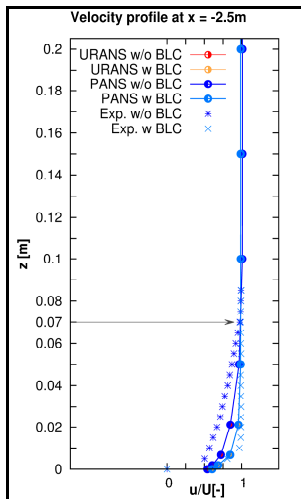


Bild 4.40: Vergleich der Geschwindigkeits-profile an der Stelle $x = -2,5m$ im leeren Windkanalnachbau mit und ohne *BLC*.

Anschließend wurden die Geschwindigkeitsprofile der URANS und PANS Simulationen mit und ohne *BLC* mit den experimentellen Daten verglichen (siehe Bild 4.40). Die URANS und PANS Simulationen haben an dieser Stelle ein identisches Geschwindigkeitsprofil. Bei der Variante ohne *BLC* wird die Geschwindigkeit in der Grenzschicht im Vergleich zum Experiment überschätzt. Die *BLC* Variante liefert eine bessere Übereinstimmung mit den experimentellen Daten; trotzdem wird die Geschwindigkeit in der Grenzschicht etwas unterschätzt. Bedenkt man, dass die Punkte an der Linie einzelne Gitterzellen darstellen (das Gitter in dieser Entfernung vor dem Fahrzeugmodell ist relativ grob aufgebaut), lässt sich diese Übereinstimmung als ausreichend betrachten. Eine Änderung des Geschwindigkeitsprofils wurde durch die Grenzschichtabsaugung *BLC* erfolgreich nachgestellt.

Zum Schluss werden die drei Simulationsverfahren anhand des *Q*-Kriteriums miteinander verglichen.

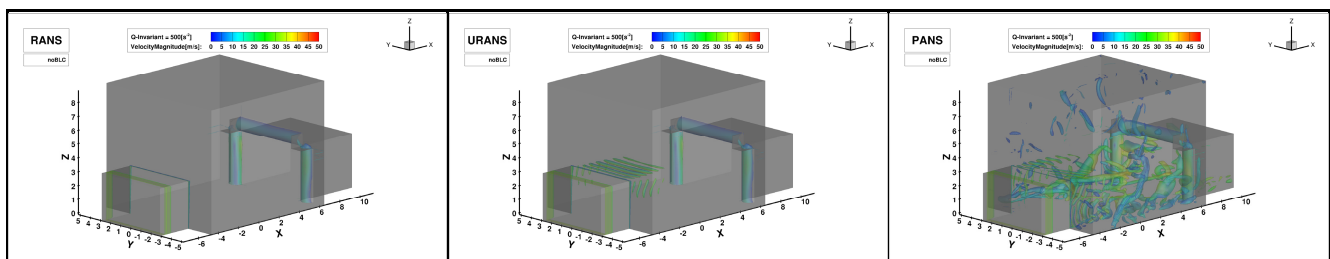


Bild 4.41: Vergleich der Strukturen des augenblicklichen *Q*-Kriteriums durch augenblickliche Geschwindigkeit gefüllt bei RANS, URANS, PANS Verfahren im leeren Windkanalnachbau ohne Grenzschichtabsaugung *BLC*.

Das Bild 4.41 zeigt die Iso-Fläche mit einem Wert von $Q = 500s^{-2}$, die mit der Geschwindigkeit gefärbt ist. Bei den RANS und URANS Simulationen sind nur Verwirbelungen an dem Düsenaustritt und dem Kollektoreintritt sichtbar. Bei der PANS Simulation sind auch feinere Wirbelstrukturen im Plenum reproduzierbar. Diese Feinstrukturen entstehen hauptsächlich beim Vermischen des Freistrahls mit ruhender Luft der Umgebung.

4.2.2. Computertechnische Auswertung

Dieses Kapitel behandelt die Durchführung der Berechnungen. Es wird in den Aufbau eines Hochleistungsrechners näher eingegangen. Über die benutzte Hardware wird diskutiert. Anschließend wird die optimale Prozessoranzahl zu der Gittergröße bzw. der Zellenanzahl bestimmt.

Berechnungen in dieser Arbeit wurden an mehreren Hochleistungsrechnern unterschiedlicher Institutionen durchgeführt. Berechnungen aus dem Kapitel 4 Umströmung eines realistischen Fahrzeuges (*RealCar*) wurden an dem Hochleistungsrechner *Fuchs* des Center for Scientific Computing (CSC) an der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main und an den Hochleistungsrechnern *Interimscluster (iCluster)* und *Lichtenberg-Hochleistungsrechner (lCluster)* des Hochschulrechenzentrums an der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt. Die Tabelle 4.8 beschreibt den damaligen Stand zu dem die Berechnungen durchgeführt wurden und nur die Rechensektionen, die verwendet wurden. Die Schnelligkeit der Berechnung an einem Hochleistungsrechner hängt von mehreren Faktoren ab. Weil die Hochleistungsrechner parallel ausgerichtet sind, sind nicht nur der Prozessortakt, der die Frequenz der Operationen pro Sekunde bestimmt, und die Anzahl der Prozessorkernen mit *Cache*-Größe, sondern auch die Verbindung der Prozessoren entscheidend. Der *CSC Cluster* und der *lCluster* verwenden Rechenknoten mit je zwei Prozessoren auf einer

Mutterplatine. Bei dem *iCluster* handelt es sich um eine *Quad CPU* Architektur. Weil eine weitere Steigerung der Tankfrequenz schwer realisierbar ist - ab einer Rechenfrequenz von *4GHz* steigt der Energieverbrauch durch die Ableitung der entstehenden Wärme rasant an - ist die Kernanzahl und die Speicheranbringung für die Leistungsfähigkeit entscheidend. Die *AMD* Prozessoren des *CSC Clusters* und des *iClusters* sind mit einem Puffer-Speicher *Cache* für jeden Kern ausgestattet, während bei den *Intel* Prozessoren des *lClusters* der *Cache* zentral für alle Kerne betrieben wird. Der *Cache* besteht aus mehreren Stufen die als *Level (L1, L2, L3)* bezeichnet werden. Ihre Größen bei den hier verwendeten Prozessoren sind in der Tabelle 4.8 eingetragen. Bei dem *AMD Opteron 2XXX* Prozessor handelt es sich um einen Prozessor mit 6 Kernen, der für eine *Dual CPU* Architektur geeignet ist. Der bei *iCluster* verwendete Prozessor *AMD Opteron 6344* ist dann Teil einer *Quad CPU* Architektur mit 12 Kernen. Der Prozessor *Intel Xeon E5-2670* hat 8 Kerne, er basiert auf einer *Sandy-Bridge* Mikroarchitektur und gehört zu dem *Dual CPU* Aufbau. Multipliziert man die Prozessorkerne mit der Anzahl von Prozessoren, bekommt man die Anzahl der Prozessorkerne auf einem Rechenknoten.

Die Rechenknoten sind dann miteinander durch eine Hardwareschnittstelle namens *InfiniBand* verbunden. Der *CSC Cluster* und der *iCluster* sind durch das *QDR InfiniBand* mit einer *40Gbps*-Verbindung ausgestattet. Der *lCluster* verbindet die *Intel Xeon* Prozessoren mit der *Sandy-Bridge* Mikroarchitektur durch das *InfiniBand FDR-10* mit einer Datenübertragungsrate von *56Gbps*.

Tabelle 4.8: Liste der verwendeten Hochleistungsrechner mit ihren Merkmalen.

HPC	Processor	Clock [GHz]	Cores	Cache L2 / L3 [MB]	Cores per Node	GB RAM per Node	Infiniband	Job Scheduler
moabmaster	Intel Xeon E5472	3,00	4	12 / 0	8	?	?	Moab
	AMD Opteron 6136	2,40	8	4 / 12	32	?		
CSC	AMD Opteron 2XXX	?	6	? / ?	12	32	QDR	PBS Torque
iCluster	AMD Opteron 6344	2,60	12	12 / 16	48	64 - 128	QDR	SLURM
lCluster	Intel Xeon E5-2670	2,60	8	2 / 20	16	32 - 64	FDR-10	LSF /
	Intel Xeon E5-2680 v3	2,50	12	3 / 30	24	64	FDR-14	SLURM

Die Ablaufplanung wird an einem Hochleistungsrechner durch einen *Job Scheduler* kontrolliert. Die hier benutzen Hochleistungsrechner verwenden unterschiedliche *Batch* Systeme. Der *CSC Cluster* benutzt *PBS Torque*, der *iCluster* *SLURM* und der *lCluster* benutzte zuerst *LSF* und anschließend *SLURM*. Bevor eine Berechnung auf dem Hochleistungsrechner gestartet wird, müssen ihre Parameter durch verschiedene *Batch* Befehle definiert werden. Als Beispiel ist hier ein *SLURM Batch* Skript aus dem *lCluster* gezeigt:

```
#!/bin/bash

#SBATCH -J RealCar_Calculation4_128_Wheels-BLC-PANS
#SBATCH -o /home/se43toki/output/RealCar_Calculation4_128_Wheels-BLC-PANS.out.%j
#SBATCH -e /home/se43toki/output/RealCar_Calculation4_128_Wheels-BLC-PANS.err.%j
#SBATCH -t 23:59:59
#SBATCH --mem-per-cpu=1800
#SBATCH -n 128
#SBATCH -C avx&mpi
#SBATCH --mail-user=lkutej@sla.tu-darmstadt.de
#SBATCH --mail-type=ALL
#SBATCH -D /work/scratch/se43toki/FIRE
#SBATCH --exclusive

cat $(srun hostname|sort|uniq -c|awk -v ORS=":" '{print $2 " ", $1 " ",mpi}'|cat|sed 's/:$/g') > hostlist.$SLURM_JOB_ID

export AVLAST_HOME="/home/groups/da_sla/AVL"
export PATH="$AVLAST_HOME/bin:$PATH"
export LM_LICENSE_FILE=/home/groups/da_sla/AVL/License/license.dat:27009@merida.csi.tu-darmstadt.de:27009@pluto.csi.tu-darmstadt.de:27009@license.csi.tu-darmstadt.de

cfdwm_solver -name=fire -version=v2011.1 -project_dir=/work/scratch/se43toki/FIRE/RealCar_Calculation4 -project=RealCar.fpr -
case=Wheels-BLC-PANS -restart=Wheels-BLC-PANS.bc_10300 -nomapping -mpi -cpu=$SLURM_NTASKS -hostlist=$(srun hostname|sort|uniq -c|awk -
v ORS=":" '{print $2 " ", $1 " ",mpi}'|cat|sed 's/:$/g') -ssh
```

Durch verschiedene Parameter wird die Rechenzeit, die Anzahl der Prozessoren, der geforderte Arbeitsspeicher, eine Benachrichtigung durch Email und die Reservierung von kompletten Knoten definiert. Die unteren Zeilen sind für das Programm *AVL Fire* relevant. Zuerst wird der Pfad zur Installation und zu dem Lizenzserver festgestellt. Anschließend werden die Eigenschaften der Simulation, wie zum Beispiel der Case, die *Backup* Datei - beim Anhalten der Prozessoranzahl während der gesamten Berechnung können die *Backup* Dateien nicht einzeln, sondern nur auf einmal geladen werden (*nomapping*) – und die Liste der verwendeten Rechenknoten, die hier in eine für *AVL Fire* lesbare Form umgewandelt wird, bestimmt.

Die Tabelle 4.9 zeigt eine Übersicht über die durchgeführten Simulationen, über die verwendeten Ressourcen und über den Rechenaufwand.

Tabelle 4.9: Liste von im Kapitel 4 Umströmung eines realistischen Fahrzeuges (*RealCar*) durchgeführten Simulationen mit verwendeten Ressourcen und ihrem Rechenaufwand.

Case	Architecture	Cluster	CPUs	IT/TS	IT in TS	Sum [tt hh:mm:ss]	1 IT/TS / [s]	CPU-Hours	CPU-H 10k	
Wheels-	RANS	AMD Opteron(tm) Processor 6344	iCluster	32	44885	1	32 09:03:45	62	24866	5540
	RANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	iCluster	32	6000	1	2 00:32:30	29	1553	2589
	URANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	iCluster	64	7802	10	0 00:00:00	0	0	0
Wheels_IO-	PANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	iCluster	64	10300	15	0 00:00:00	0	0	0
	RANS	Six-Core AMD Opteron(tm) Processor 2	CSC	32	50000	1	45 22:22:54	79	35276	7055
	URANS	Six-Core AMD Opteron(tm) Processor 2	CSC	32	8060	10	50 10:54:40	541	38749	48076
	PANS	Six-Core AMD Opteron(tm) Processor 2	CSC	32	5500	10	37 07:36:03	586	28659	52108
Wheels-BLC-	PANS	Six-Core AMD Opteron(tm) Processor 2	CSC	64	5665	10	18 19:31:39	287	28898	51011
	RANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	iCluster	128	80000	1	6 16:46:04	7	20578	2572
	URANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	iCluster	128	10300	10	8 03:56:09	68	25080	24349
	PANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	iCluster	128	10300	15	9 18:34:06	82	30025	29150

Alle Simulationen haben ihre Zellenanzahl in der gleichen Größenordnung; man kann also bei ihnen den Rechenaufwand gut vergleichen. Aus der Tabelle 4.9 lassen sich paar interessante Schlussfolgerungen ziehen. Der Case *Wheels-RANS* wurde mit der gleichen Prozessoranzahl auf dem *iCluster* und auf dem *iCluster* berechnet. Das bietet einen direkten Vergleich zwischen beiden Hochleistungsrechnern. Der Case *Wheels-BLC-PANS* wurde auf dem *CSC Cluster* mit zwei unterschiedlichen Prozessoranzahlen berechnet. Dadurch kann man die Skalierbarkeit beurteilen. Die wirbelauflösende PANS Methode zeigt einen nur leicht erhöhten Rechenaufwand im Vergleich zu einem dazu äquivalenten URANS Verfahren. Die Tabelle 4.9 zeigt nach der Prozessoranzahl, die für die Berechnung benutzt wurde, die Anzahl von Iterationen bei RANS und bei URANS, PANS die Anzahl der *Time Steps*, einschließlich der Iterationsanzahl innerhalb eines *Time Step*, die berechnet wurden. Die gesamte Rechenzeit wird auf vergleichbare Werte skaliert. Aus der Rechenzeit und der Anzahl der Iterationen bzw. *Time Steps* folgt die Zeitdauer einer Iteration bzw. eines *Time Step*. Weiter wird die Rechendauer durch eine Multiplikation mit der Prozessoranzahl auf die CPU-Stunden umgerechnet. So lassen sich Berechnungen mit unterschiedlicher Prozessoranzahl miteinander vergleichen. Weil bei den Simulationen eine unterschiedliche Anzahl von Iterationen bzw. *Time Steps* berechnet wurde, werden die CPU-Stunden auf CPU-Stunden, die für 10000 Iterationen bzw. *Time Steps* benötigt werden, skaliert. Die skalierten CPU-Stunden sind auf dem Bild 4.42 links aufgetragen.

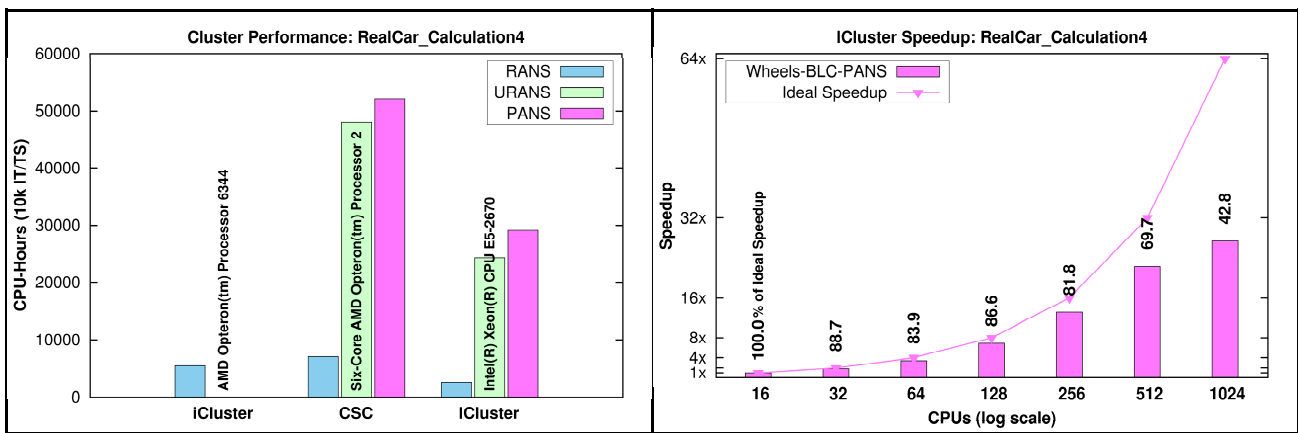


Bild 4.42: Vergleich des Rechenaufwands in Prozessorstunden bei RANS, URANS, PANS Verfahren auf verwendeten Hochleistungsrechnern (links) und Speedup einer RealCar Berechnung auf dem *iCluster* (rechts).

Beim Vergleich der RANS Simulationen muss bedacht werden, dass die RANS Simulation auf dem *iCluster* mit einer höheren Prozessoranzahl berechnet wurde, was sich auf die Performance, wie später gezeigt wird, kontraproduktiv auswirkt. Trotzdem sind die *Intel Xeon E5-2670* Prozessoren des *iClusters* doppelt so schnell wie die *AMD Opteron 6344* Prozessoren des *iClusters* und fast dreimal schneller als die *AMD Opteron 2XXX* Prozessoren des *CSC Clusters*. Bei den *AMD* Prozessoren ist die Quad-CPU Architektur mit den 12-Kernprozessoren um zirka 30% schneller als die Dual-CPU Architektur mit den 6-Kernprozessoren des *CSC Clusters*. Beim Vergleich der URANS Simulationen ist dann der *iCluster* nur doppelt so schnell als der *CSC Cluster*.

Vergleicht man das URANS und PANS Verfahren bei den Simulationen auf dem *CSC Cluster*, bei denen gemeinsam 10 Iterationen innerhalb eines *Time Step* berechnet wurden, miteinander, bekommt man einen richtigen Rechenaufwand von beiden Methoden. Bei PANS müssen außer den Reynoldsschen Gleichungen, der Kontinuitätsgleichung, sowie der k -, ϵ -, ζ - und f -Gleichung, die für URANS und PANS gemeinsam sind, zusätzlich noch der f_k Parameter berechnet und die Geschwindigkeitskomponenten online gemittelt werden.

Dieser Mehraufwand von 8% zu URANS wird in Kauf genommen, weil die PANS Methode deutlich bessere Ergebnisse liefert. Die PANS Simulationen sind nicht direkt vergleichbar, weil bei den Berechnungen auf den zwei Hochleistungsrechnern eine unterschiedliche Iterationsanzahl innerhalb eines *Time Step* benutzt wurde. Trotzdem erreicht der *lCluster* eine 75%ige Leistungssteigerung. Anhand der PANS Simulationen kann auch die Skalierbarkeit untersucht werden. Zurück zu Tabelle 4.9: dort sind zwei PANS Simulationen, die auf dem *CSC Cluster* durchgeführt wurden, aufgetragen. Zwischen den 32-CPU und den 64-CPU Kalkulationen wurde eine sehr gute Skalierbarkeit erreicht, sodass beim Verdoppeln der Prozessoren von 32 auf 64 die Rechendauer halbiert werden konnte. Hier handelt es sich um ein Zusammenspiel der Ereignisse, dass die Leistung bei der 64-CPU Kalkulation noch um 2% gestiegen ist. Warum sich die Leistung mit steigender Parallelisierung normalerweise verringert, erklärt das Amdahlsche Gesetz: Die Rechengeschwindigkeit eines Mehrkernprozessors hängt davon ab, wie hoch der Anteil am Programm-Code ist, der parallel ausgeführt werden kann. Die Parallelisierung erfolgt in *AVL Fire* durch seine eigene MPI-Applikation. Als *Speedup* wird der Zusammenhang zwischen der seriellen und der parallelen Ausführungszeit eines Programm-Codes bezeichnet. Bei einem idealen *Speedup* sinkt die Ausführungszeit linear mit steigender Prozessoranzahl.

Bild 4.42 rechts fasst dies zusammen. Neben dem idealen *Speedup* wird dort ein realer *Speedup* für *AVL Fire* Programm und die *RealCar_Calculation4 Wheels-BLC-PANS* auf dem *lCluster* gezeigt. Wegen der Anforderungen an den Arbeitsspeicher ist der *Speedup* nicht auf ein Single-Prozessor sondern auf 16 Prozessoren (Kerne) bezogen. Für diese Kalkulation scheint ein Optimum zwischen Rechendauer und Rechenleistung eine 128-CPU oder 256-CPU Berechnung zu sein.

Ein weiteres Kriterium, das berücksichtigt werden muss, ist die Anforderung an den Arbeitsspeicher. Diese Kalkulation benötigt während der Berechnung 85,5GB RAM, und zwar 18GB RAM bei der Gitterdekomposition, 80GB RAM beim Laden von *backup* Dateien (76GB RAM im *nomapping* Modus) und 85,5GB RAM beim Iterieren und Ausschreiben von *backup* und *3D Results* Dateien. Bei dem *AVL Fire GUI* bedarf es 8,7GB RAM für die Gitterbearbeitung und 18GB RAM für die Darstellung der Ergebnisse. Bei einer Berechnung auf dem Hochleistungsrechner muss ein Kompromiss zwischen Rechenzeit, Rechenleistung, gefordertem Arbeitsspeicher und verfügbaren Ressourcen getroffen werden.

5. Quasi-stationärer PKW-LKW Überholvorgang (*RealCar and Truck*)

Dieses Kapitel widmet sich dem Überholvorgang zwischen einem PKW und einem LKW. Für den PKW wurde das vereinfachte Modell des BMW 5er-Reihe E60: *RealCar* übernommen. Den Lastwagen stellt ein grob vereinfachtes Modell mit einer gekürzten Länge von $l = 2,5m$ dar. Das LKW-Modell weist eine sehr kantige Geometrie aus. Es ist nicht durchgeströmt, hat keine Seitenspiegel und keine Radläufe. Das Chassis und die Räder sind vereinfacht dargestellt. Bei beiden Fahrzeugen handelt es sich weiterhin um einen Modellmaßstab 1:2,5. Der Überholvorgang ist durch acht diskrete Überholpositionen dargestellt. Die Position des Personenkraftwagens in dem Windkanal ist in Bezug auf den Case *RealCar* unverändert geblieben. Die Mitte der Vorderachse stellt den Anfang des Koordinationssystems dar. Bei den einzelnen Überholpositionen ändert sich nur die Position des Lastwagens. Der Abstand zwischen beiden Fahrzeugen bleibt während der ganzen Untersuchung konstant.

Die Randbedingungen sind ähnlich wie im Kapitel 4 Umströmung eines realistischen Fahrzeuges (*RealCar*). Die Anströmgeschwindigkeit $U_\infty = 38,89ms^{-1}$ ist unverändert geblieben. Auf der Auslassebene wurde ausschließlich der Nullgradient aller Variablen verwendet. Der rechte, linke und obere Rand der *IO*-Domäne wurde wieder als eine Symmetrieebene definiert. Bei Fällen mit Grenzschichtabsaugung *BLC* wurde ebenso an der relevanten auf dem Boden vor dem Fahrzeug positionierten Einlassebene eine zur Ebene normale (negative) Geschwindigkeit von $u = -2,7 ms^{-1}$ vorgeschrieben und an der dazu passenden Auslassebene hinter dem Fahrzeug die Geschwindigkeitskomponenten $u_x = 2 ms^{-1}$ und $u_z = 2 ms^{-1}$.

Die instationären URANS und PANS Simulationen wurden mit einem Zeitschritt $\Delta t = 0,001s$ über die Simulationszeit von $t = 10,3s$ berechnet. Ein Zeitschritt besteht bei URANS aus 10 und bei PANS aus 15 Iterationen. Nur die RANS Simulationen wurden auf 80000 Iterationen verlängert.

Das $k - \varepsilon - \zeta - f$ Turbulenzmodell wurde in Verbindung mit den hybriden Wandfunktionen eingesetzt. Auch die restlichen Solver-Einstellungen wie die *SIMPLE* Methode für die Druck-Geschwindigkeits-Kopplung, sowie die TVD Diskretisierungsschemata *MINMOD Relaxed* und *AVL SMART Relaxed* sind unverändert geblieben. Die Strömung wird als inkompressibel betrachtet. Das Arbeitsmedium (Luft) wird als ideales Gas behandelt.

Eine genaue Auflistung aller Einstellungen des Löser, die der Reihenfolge des *AVL Fire GUI* entspricht, steht im Anhang B Einstellungen des Löser (*RealCar and Truck*).

5.1. Berechnungsvorbereitung

Die Gittergenerierung erfolgt wieder durch das *FAME Hexa* Werkzeug. Die Gitter um das PKW-Modell und um das LKW-Modell sind separat generiert. Bei dem *FAME Hexa* Gitter für das PKW-Modell wurden die Einstellungen für die *Selections* von dem Oberflächengitter (*Surface*) und dem Kantengitter (*Edges*) aus dem Kapitel 4 Umströmung eines realistischen Fahrzeuges (*RealCar*) übernommen. Ebenso die Ausgangszellengröße *Max Cell Size*, auf die alle Verfeinerungsstufen bezogen sind, ist unverändert geblieben. Die *Selections* auf dem *Surface* erfassen nicht nur strömungsrelevante Gebiete, sondern auch Stellen, wo die geometrischen Konturen angehalten werden sollten. An Stellen des Kantengitters richtet der *FAME Hexa* Vernetzer bei der Gittergenerierung die Zellenknoten. Aus diesem Grund werden die *Edges* manuell definiert nur dort, wo sich auf der Modellgeometrie tatsächlich Kanten, oder Übergänge zur Krümmung befinden.

In der Tabelle 5.1 ist die vordefinierte Dicke der Verfeinerungsschicht als *Depth* in der fünften Spalte definiert. Eine *Surface Selection* verfeinert das Gitter immer unterhalb und oberhalb der Fläche. Bei der *Edge Selection* entsteht eine kreisförmige Schicht um die Kante herum. Durch die *Surface Selections* werden Verfeinerungsstufen *Refinement Level 5, 6 und 7* an folgenden Bauteilen: Abgasanlage, Antrieb, Außenspiegel, Fahrwerk, Felgen, Hinterachse, Staupunkt, Staulippen, Unterbodendetails, Tunnelbrücke realisiert.

Tabelle 5.1: Einstellungen des *FAME Hexa* Vernetzers des *CAR* Teils beim *RealCar_n_Truck_positions*.

RealCar_n_Truck_positions				
All Cases				
General settings	Case	FAMEHexa_CAR_test3-3-G-7i_test8b.flm		
	Mesh	Surface_1_wheels_Car.flm		
	Import surface [m]:	edges_1_0143_Car.flm		
	Import edges [m]:	Standard		
	Trimming method	Standard		
	Domain recognition	Standard		
	Max cell size [m]	0.05		
	User specified octree center:	x [m]	y [m]	z [m]
		2.3001956	0	0.3570000008
	Boundary layer optimization	Volume optimizer		
Smoothing	Volume optimizer			
Model details	Preserve model details			
Refinements	Selection	Refinement level	Cell size [m]	Depth [m]
	abgasanlage_ref1	5	0.001563	0.007815
	antrieb_hinten_ref1	5	0.001563	0.007815
	aussenspiegel_ref1	5	0.001563	0.007815
	fahrwerk_vorn_ref1	5	0.001563	0.007815
	felgen_hinten_ref1	5	0.001563	0.007815
	felgen_vorn_ref1	5	0.001563	0.007815
	hinterachse_ref1	5	0.001563	0.007815
	nase_ref1	5	0.001563	0.007815
	staulippen_hinten_ref1	5	0.001563	0.007815
	staulippen_vorn_ref1	5	0.001563	0.007815
	tunnelbruecke_ref1	5	0.001563	0.007815
	antrieb_hinten_ref2	6	0.000781	0.001563
	aussenspiegel_ref2	6	0.000781	0.001563
	fahrwerk_vorn_ref2	6	0.000781	0.001563
	felgen_hinten_ref2	6	0.000781	0.000781
	felgen_vorn_ref2	6	0.000781	0.000781
	hinterachse_ref2	6	0.000781	0.001172
	staulippen_hinten_ref2	6	0.000781	0.001563
	staulippen_vorn_ref2	6	0.000781	0.001563
	unterboden_ref2	6	0.000781	0.001563
	antrieb_hinten_ref3	7	0.000391	0.000781
	aussenspiegel_ref3x	7	0.000391	0.000781
	hinterachse_ref3	7	0.000391	0.000391
staulippen_hinten_ref3i	7	0.000391	0.000391	
Edge refinements	Selection	Refinement level	Cell size [m]	Depth [m]
	edges_abgasanlage_ref1	4	0.003125	0.023440
	edges_antrieb_hinten_ref1	4	0.003125	0.023440
	edges_aussenspiegel_ref1	4	0.003125	0.023440
	edges_fahrwerk_vorn_ref1	4	0.003125	0.023440
	edges_hinterachse_ref1	4	0.003125	0.023440
	edges_karosserie_ref1	4	0.003125	0.023440
	edges_raeder_hinten_ref1	4	0.003125	0.023440
	edges_raeder_vorn_ref1	4	0.003125	0.023440
	edges_staulippen_hinten_ref1	4	0.003125	0.023440
	edges_staulippen_vorn_ref1	4	0.003125	0.023440
	edges_tunnelbruecke_ref1	4	0.003125	0.023440
	edges_unterboden_ref1	4	0.003125	0.023440
	edges_abgasanlage	5	0.001563	0.000781
	edges_antrieb_hinten	5	0.001563	0.000781
	edges_aussenspiegel	5	0.001563	0.000781
	edges_fahrwerk_vorn	5	0.001563	0.000781
	edges_hinterachse	5	0.001563	0.000781
	edges_karosserie	5	0.001563	0.000781
	edges_raeder_hinten	5	0.001563	0.000781
	edges_raeder_vorn	5	0.001563	0.000781
	edges_staulippen_hinten	5	0.001563	0.000781
	edges_staulippen_vorn	5	0.001563	0.000781
	edges_tunnelbruecke	5	0.001563	0.000781
	edges_unterboden	5	0.001563	0.000781
	edges_aussenspiegel_ref2	6	0.000781	0.000781
	edges_fahrwerk_vorn_ref2	6	0.000781	0.000781
	edges_hinterachse_ref2	6	0.000781	0.001172
	edges_karosserie_ref2	6	0.000781	0.000781
	edges_raeder_hinten_ref2	6	0.000781	0.001172
	edges_raeder_vorn_ref2	6	0.000781	0.001172
	edges_staulippen_hinten_ref2	6	0.000781	0.001563
	edges_staulippen_vorn_ref2	6	0.000781	0.001563
	edges_unterboden_ref2	6	0.000781	0.001172
	edges_aussenspiegel_ref3	7	0.000391	0.000391
	edges_hinterachse_ref3	7	0.000391	0.000391
edges_staulippen_hinten_ref3	7	0.000391	0.000391	
edges_staulippen_vorn_ref3	7	0.000391	0.000391	
edges_unterboden_ref3	7	0.000391	0.000391	

Im Gegensatz zu geraden Flächen wird an den Kanten und Krümmungen eine Ablösung erwartet. Für eine korrekte Ausbildung der Ablösung wird bei dem *Edge Refinement* im Vergleich zu dem *Surface Refinement* eine dickere Verfeinerungsschicht mit *Refinement Level 4* angewandt. Die *Edge Selections* mit *Refinement Level 4, 5, 6, 7* werden an Kanten folgender Teilen verwendet: Abgasanlage, Antrieb, Außenspiegel, Fahrwerk, Hinterachse, Räder, Staulippen, Tunnelbrücke, Unterbodendetails und an führenden Kanten der Karosserie.

Verfeinerungsstufen bis *Refinement Level 3* werden durch 3D-Objekte Boxen durchgeführt. Der Vorteil bei dieser Verfeinerungsmethode ist, dass nur das Gitter innerhalb des 3D-Object verfeinert wird. Die meisten Boxen wurden ebenso aus dem Kapitel 4 Umströmung eines realistischen Fahrzeuges (*RealCar*) übernommen, zwei Boxen wurden an den Überholvorgang angepasst und eine neu hinzugefügt. Dabei wurde wieder nur eine einstufige Verfeinerung angehalten. Die zwei modifizierten Boxen stellen *Box_CAR_around_ref2* und *Box_CAR-TRUCK_BLT* mit einem *Refinement Level 1* dar. Die Box *Box_CAR_around_ref2* wurde in der positiven *y*-Richtung verbreitert, damit sie auch den Raum zwischen beiden Fahrzeugmodellen ausfüllt, und in positiver *z*-Richtung erhöht. Damit wurde sie an die Boxen des LKW-Modells angepasst, wodurch die Strömung in höheren Partien des LKW-Modells durch Zellen gleicher Auflösung oberhalb des PKW-Modells gefangen werden kann. Die Box *Box_CAR-TRUCK_BLT* wurde ebenso in positiver *y*-Richtung verbreitert, damit sich auch zwischen beiden Fahrzeugmodellen die Grenzschicht genauer aufbauen kann. Boxen mit dem *Refinement Level 2* sind die *Box_car_around_1a*, *Box_car_around_1b*, *Box_car_wake* und dazu die neu zugefügte *Box_CAR-TRUCK_interface*, die den Zwischenraum

	File Name	Fire Name	Center			Sides			Refinement level
			X	Y	Z	X	Y	Z	
Box refinements	Box_wheel_FL.prp	Box_0001	0.0	-0.275	-0.04	0.4	0.25	0.4	3
	Box_wheel_FR.prp	Box_0002	0.0	0.275	-0.04	0.4	0.25	0.4	3
	Box_wheel_RL.prp	Box_0003	1.154	-0.3	-0.04	0.4	0.2	0.4	3
	Box_wheel_RR.prp	Box_0004	1.154	0.3	-0.04	0.4	0.2	0.4	3
	Box_CAR-TRUCK_BLT.prp	Box_0037	3.0	0.7409875	-0.14	8.2	2.781975	0.2	1
	Box_car_wake.prp	Box_0007	3.15	0.0	0.16	4.5	1.2	0.8	2
	Box_car_around_1a.prp	Box_0005	-0.2	0.0	0.06	0.6	1.0	0.6	2
	Box_car_around_1b.prp	Box_0006	0.925	0.0	0.135	1.65	1.0	0.75	2
	Box_car_ground.prp	Box_0010	0.625	0.0	-0.125	2.05	0.8	0.23	3
	Box_CAR_around_ref2.prp	Box_0008	2.425	0.7409875	0.585	5.95	2.781975	1.65	1
	Box_car_1_1.prp	Box_0011	0.626	0.0	0.043	2.0	0.79	0.3	3
	Box_car_1_2.prp	Box_0012	0.663	0.0	0.20975	1.926	0.79	0.0335	3
	Box_car_1_3.prp	Box_0013	0.7	0.0	0.24325	1.852	0.79	0.0335	3
	Box_car_1_4.prp	Box_0014	0.774	0.0	0.275	1.704	0.73	0.03	3
	Box_car_1_5.prp	Box_0015	0.848	0.0	0.305	1.556	0.67	0.03	3
	Box_car_1_6.prp	Box_0016	0.848	0.0	0.3275	1.26	0.64	0.015	3
	Box_car_1_7.prp	Box_0017	0.848	0.0	0.3425	1.112	0.61	0.015	3
	Box_car_1_8.prp	Box_0018	0.8295	0.0	0.3575	1.001	0.595	0.015	3
	Box_car_1_9.prp	Box_0019	0.82025	0.0	0.3725	0.9455	0.58	0.015	3
	Box_car_1_10.prp	Box_0020	0.811	0.0	0.3875	0.89	0.565	0.015	3
	Box_car_1_11.prp	Box_0021	0.80175	0.0	0.4025	0.8345	0.55	0.015	3
	Box_car_1_12.prp	Box_0022	0.80175	0.0	0.4175	0.7605	0.535	0.015	3
	Box_car_1_13.prp	Box_0023	0.80175	0.0	0.4325	0.6865	0.505	0.015	3
	Box_car_1_14.prp	Box_0024	0.80175	0.0	0.4475	0.6125	0.475	0.015	3
	Box_car_1_15.prp	Box_0025	0.80175	0.0	0.4625	0.4645	0.415	0.015	3
	Box_car_1_mirrors.prp	Box_0026	0.466	0.0	0.273375	0.3125	0.9	0.13125	3
	Box_car_1_mirror_left.prp	Box_0027	0.41	-0.364	0.272	0.15	0.106	0.075	5
	Box_car_1_mirror_right.prp	Box_0028	0.41	0.364	0.272	0.15	0.106	0.075	5
	Box_CAR-TRUCK_interface.prp	Box_0039	3.0	0.7	0.56	8.2	1.0	1.6	2
	Boundary layers	Selection		Number of layers		Ratio		Thickness [m]	
boden_BL			3		3		0.0001		
Surface intersection	Selection		Remove intersected cells						
	antrieb_hinten_ref4x		yes						
	aussenspiegel_ref3x		yes						
	hinterachse_ref3x		yes						
	staulippen_hinten_ref3		yes						
	staulippen_vorn_ref3		yes						

zusätzlich verfeinert. Die Box *Box_CAR-TRUCK_interface* geht ebenso wie Boxen *Box_CAR_around_ref2*, *Box_CAR-TRUCK_BLT*, *Box_car_wake*, aus der *FAME Hexa* Domäne hinaus und gewährleistet somit zwischen den Fahrzeugmodellen ein feineres Gitter entlang der ganzen Rechendomäne. Boxen mit dem *Refinement Level 3* sind die *Box_wheel_XX*, *Box_car_XX*, *Box_car_ground*. Dank der gleichen Gitterauflösung unterhalb und oberhalb des Fahrzeugmodells bleibt die Umströmung durch das Gitter unbeeinflusst. Eine Ausnahme stellen die Boxen, die bei den Außenspiegeln verwendet wurden, dar. Die Box *Box_car_1_mirrors* hat zwar das *Refinement Level 3*, sie dient für die Gitterverfeinerung in dem Nachlauf der beiden Außenspiegel. Für die genaue Abbildung der Außenspiegelgeometrie mussten aber die Boxen *Box_car_1_mirror_right*, *Box_car_1_mirror_left* mit dem *Refinement Level 5* versehen werden.

Für die *Boundary Layers*, *Surface Intersection* und ebenso für die *General Settings* gelten gleiche Einstellungen wie im Kapitel 4 Umströmung eines realistischen Fahrzeuges (*RealCar*).

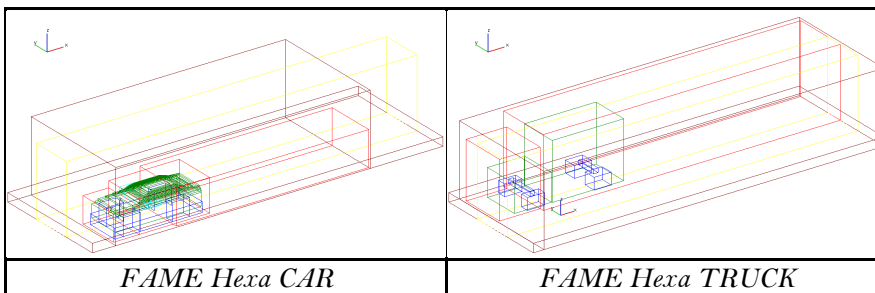


Bild 5.1: Boxenanordnung für die Domänen *CAR* und *TRUCK*.

TRUCK Domäne angeglichen.

Bild 5.1 zeigt die räumliche Verteilung der Boxen. Links für die *FAME Hexa* Domäne *CAR*, rechts für die *FAME Hexa* Domäne *TRUCK*. Die Domäne *FAME Hexa CAR* ist wieder 6m lang, seitlich wurde sie aber in positiver *y*-Richtung um 0,1m abgekürzt und ist jetzt 1,5m breit. Durch die Vergrößerung der Höhe auf 1,8m wurde sie an die *FAME Hexa*

Tabelle 5.2: Einstellungen des *FAME Hexa* Vernetzers des Teils *TRUCK* (fein) beim *RealCar_n_Truck_positions*.

		RealCar_n_Truck_positions				
Case		RealCar_n_Truck_pos039-Calculation1				
General settings	Mesh	FAMEHexa_TRUCK_G1-test2.flm				
	Import surface [m]:	Surface_1_wheels_0142_Truck.flm				
	Import edges [m]:	edges_1_wheels_0142_Truck.flm				
	Trimming method	Standard				
	Domain recognition	Standard				
	Max cell size [m]	0.05				
	Boundary layer optimization	Volume optimizer				
	Smoothing	Volume optimizer				
	Model details	Preserve model details				
	Refinements	Selection	Refinement level	Cell size [m]	Depth [m]	
LKW_karosserie_ref3		3	0.006250	0.025000		
LKW_achse_hinten_ref4		4	0.003125	0.023440		
LKW_achse_vorn_ref4		4	0.003125	0.023440		
LKW_raeder_hinten_ref4		4	0.003125	0.023440		
LKW_raeder_vorn_ref4		4	0.003125	0.023440		
Edge refinements	Selection	Refinement level	Cell size [m]	Depth [m]		
	edges_LKW_ref4	4	0.003125	0.023440		
	edges_LKW_achse_hinten_ref5	5	0.001563	0.007815		
	edges_LKW_achse_vorn_ref5	5	0.001563	0.007815		
	edges_LKW_raeder_hinten_ref5	5	0.001563	0.007815		
	edges_LKW_raeder_vorn_ref5	5	0.001563	0.007815		
Box refinements	File Name	Fire Name	Center X Y Z	Sides X Y Z	Refinement level	
	Box_TRUCK_wheel_RR.prp	Box_0029	1.66777 1.75552 -0.105	0.4 0.3 0.27	3	
	Box_TRUCK_wheel_RL.prp	Box_0030	1.66777 1.10847 -0.105	0.4 0.3 0.27	3	
	Box_TRUCK_wheel_FR.prp	Box_0031	0.107355 1.80652 -0.105	0.4 0.198 0.27	3	
	Box_TRUCK_wheel_FL.prp	Box_0032	0.107355 1.05747 -0.105	0.4 0.198 0.27	3	
	Box_CAR-TRUCK_BLT.prp	Box_0037	3.0 0.7409875 -0.14	8.2 2.781975 0.2	1	
	Box_TRUCK_around_1a.prp	Box_0035	-0.325 1.431975 0.41	0.95 1.1 1.3	2	
	Box_TRUCK_around_1b+wake.prp	Box_0036	3.625 1.431975 0.56	6.95 1.3 1.6	2	
	Box_TRUCK_around_ref2.prp	Box_0038	3.125 0.7409875 0.585	7.95 2.781975 1.65	1	
	Box_TRUCK_1_1.prp	Box_0040	1.334705 1.431975 0.41351	1.67771 0.91395 1.30702	3	
	Box_TRUCK_1_2.prp	Box_0041	0.0601145 1.431975 0.0760295	0.871471 0.88207 0.632058	3	
	Box_TRUCK_achse-vorn.prp	Box_0034	0.107355 1.431975 0.016217	0.1 0.7 0.1	3	
	Box_TRUCK_achse-hinten.prp	Box_0033	1.66777 1.431975 0.026388	0.1 0.5 0.1	3	
	Box_CAR-TRUCK_interface.prp	Box_0039	3.0 0.7 0.56	8.2 1.0 1.6	2	
	Boundary layers	Selection	Number of layers	Ratio	Thickness [m]	
		boden_BL	3	3	0.0001	
		LKW_BL	3	3	0.0001	
Surface Intersection		Selection	Remove intersected cells			
LKW_traeger_intersection	yes					

Die Domäne *FAME Hexa TRUCK* ist $8m$ lang, $1,581975m$ breit, wobei sich die Fahrzeugmitte bei $y = 1,431975m$ befindet, und $1,8m$ hoch. Übernimmt man die Einstellungen aus dem *FAME Hexa CAR*, indem das Fahrzeugmodell mit Zellen des *Refinement Level 3* umhüllt wird und Verfeinerungsstufen *Refinement Level 4, 5* eine Dicke von $0,02344m$ bzw. $0,007815m$ behalten, bekommt man das *FAME Hexa Gitter FAMEHexa_TRUCK_G1-test2.flm* mit 16242518 Zellen, siehe Tabelle 5.2.

Tabelle 5.3: Einstellungen des *FAME Hexa* Vernetzers des Teils *TRUCK* (grob) beim *RealCar_n_Truck_positions*.

		RealCar_n_Truck_positions				
Case		All Cases				
General settings	Mesh	FAMEHexa_TRUCK_G1-test6.flm				
	Import surface [m]:	Surface_1_wheels_0142_Truck.flm				
	Import edges [m]:	edges_1_wheels_0142_Truck.flm				
	Trimming method	Standard				
	Domain recognition	Standard				
	Max cell size [m]	0.05				
	Boundary layer optimization	Volume optimizer				
	Smoothing	Volume optimizer				
	Model details	Preserve model details				
	Refinements	Selection	Refinement level	Cell size [m]	Depth [m]	
LKW_karosserie_ref3		2	0.012500	0.025000		
LKW_achse_hinten_ref4		4	0.003125	0.006250		
LKW_achse_vorn_ref4		4	0.003125	0.006250		
LKW_raeder_hinten_ref4		4	0.003125	0.006250		
LKW_raeder_vorn_ref4		4	0.003125	0.006250		
Edge refinements	Selection	Refinement level	Cell size [m]	Depth [m]		
	edges_LKW_ref4	4	0.003125	0.006250		
	Box refinements	File Name	Fire Name	Center X Y Z	Sides X Y Z	Refinement level
		Box_TRUCK_wheel_RR.prp	Box_0029	1.66777 1.75552 -0.105	0.4 0.3 0.27	3
		Box_TRUCK_wheel_RL.prp	Box_0030	1.66777 1.10847 -0.105	0.4 0.3 0.27	3
		Box_TRUCK_wheel_FR.prp	Box_0031	0.107355 1.80652 -0.105	0.4 0.198 0.27	3
Box_TRUCK_wheel_FL.prp		Box_0032	0.107355 1.05747 -0.105	0.4 0.198 0.27	3	
Box_CAR-TRUCK_BLT.prp		Box_0037	3.0 0.7409875 -0.14	8.2 2.781975 0.2	1	
Box_TRUCK_around_1a.prp		Box_0035	-0.325 1.431975 0.41	0.95 1.1 1.3	2	
Box_TRUCK_around_1b+wake.prp		Box_0036	3.625 1.431975 0.56	6.95 1.3 1.6	2	
Box_TRUCK_around_ref2.prp		Box_0038	3.125 0.7409875 0.585	7.95 2.781975 1.65	1	
Box_TRUCK_1_1.prp		Box_0040	1.334705 1.431975 0.41351	1.67771 0.91395 1.30702	2	
Box_TRUCK_1_2.prp		Box_0041	0.0601145 1.431975 0.0760295	0.871471 0.88207 0.632058	2	
Box_TRUCK_achse-vorn.prp		Box_0034	0.107355 1.431975 0.016217	0.1 0.7 0.1	3	
Box_TRUCK_achse-hinten.prp		Box_0033	1.66777 1.431975 0.026388	0.1 0.5 0.1	3	
Box_CAR-TRUCK_interface.prp		Box_0039	3.0 0.7 0.56	8.2 1.0 1.6	2	
Boundary layers		Selection	Number of layers	Ratio	Thickness [m]	
		boden_BL	3	3	0.0001	
		LKW_BL	3	3	0.0001	
	Surface Intersection	Selection	Remove intersected cells			
LKW_traeger_intersection	yes					

Um den Rechenaufwand zu verkleinern, wurde die Verfeinerungsstufe an den geraden Flächen des LKW-Modells auf den *Refinement Level 2* zurückgegangen. Die Verfeinerungsdicke bei dem *Refinement Level 4* der *Surface* und *Edge Selections* wurde auch auf $0,00625m$ reduziert. Auf das *Refinement Level 5* der *Edge Selections* wurde verzichtet. Die Ausgangszellengröße *Max Cell Size* ist mit $0,05m$ unverändert geblieben. Nach diesen Änderungen beträgt das Gitter *FAMEHexa_TRUCK_G1-test6.flm* 10429101 Zellen (Tabelle 5.3). Somit konnte eine Ersparnis von 5813417 Zellen erzielt werden.

Bei der ersten Verfeinerungsstufe wird die Zellgröße halbiert. Dazu werden wieder *3D-Objects* Boxen verwendet. Die Box *Box_TRUCK_around_ref2* grenzt den Bereich des *Refinement Level 1* ab. Die Box *Box_CAR-TRUCK_BLT_ref* wurde aus dem *FAME Hexa CAR* übernommen und ebenso mit dem *Refinement Level 1* versehen, sie dient der Abbildung der Grenzschicht vor und unter dem LKW-Modell, aber auch in dem Zwischenbereich. Wie bei dem PKW-Modell wird der Bereich um das Fahrzeugmodell und dessen Nachlaufs

durch die Boxen *Box_TRUCK_around_1a* und *Box_TRUCK_around_1b+wake* mit *Refinement Level 2* verfeinert. Die gleiche Verfeinerungsstufe trägt auch die Box *Box_CAR-TRUCK_interface*, die für die Verfeinerung in dem Zwischenbereich der beiden Fahrzeugmodelle zuständig ist. In diesem Fall treten wieder Boxen *Box_CAR-TRUCK_BLT_ref*, *Box_TRUCK_around_ref2*, *Box_TRUCK_around_1b+wake* und *Box_CAR-TRUCK_interface* aus der *FAME Hexa* Domäne heraus, damit die Verfeinerung entlang des ganzen Gitters getragen wird. In der unmittelbaren Nähe des LKW-Modells sind Boxen *Box_TRUCK_1_1*, *Box_TRUCK_1_2* positioniert. Die Box *Box_TRUCK_1_2* geht bei der Fahrerkabine nur bis zur Windschutzscheibe. Weiter auf der Windschutzscheibe, Dach, Dachspoiler und über den Laderaum erfolgt die Verfeinerung wegen geometrischen Gegebenheiten durch ein *Surface Selection LKW_karosserie_rev3*. Dieses *Surface* und *Box Refinement* macht Sinn nur bei dem feinen *FAME Hexa* Gitter *FAMEHexa_TRUCK_G1-test2*, wo dort ein *Refinement Level 3* definiert ist. Boxen, wo auch bei dem groben Gitter *FAMEHexa_TRUCK_G1-test6* das *Refinement Level 3* geblieben ist, sind Boxen *Box_TRUCK_wheel_XX* um die Räder und Boxen *Box_TRUCK_achse-vorn*, *Box_TRUCK_achse-hinten* um die Achsen herum. Der nahliegende Bereich bei den Rädern und Achsen wurde wegen erwarteten Ablösungen verfeinert. Bei diesen Bauteilen wird anschließend die Oberfläche mit *Surface Selections* mit einem *Refinement Level 4* versehen. Bei dem groben Gitter wurde die Verfeinerungsdicke von $0,02344m$ auf $0,00625m$ reduziert. Alle führenden Kanten des LKW-Modells werden durch das *Edge Selection edges_LKW_ref4* mit einem *Refinement Level 4* der gleicher Dicke verfeinert. Damit wird nicht nur die Geometrie des Modells angehalten, sondern auch Bereiche potenzieller Ablösungen werden feiner vernetzt.

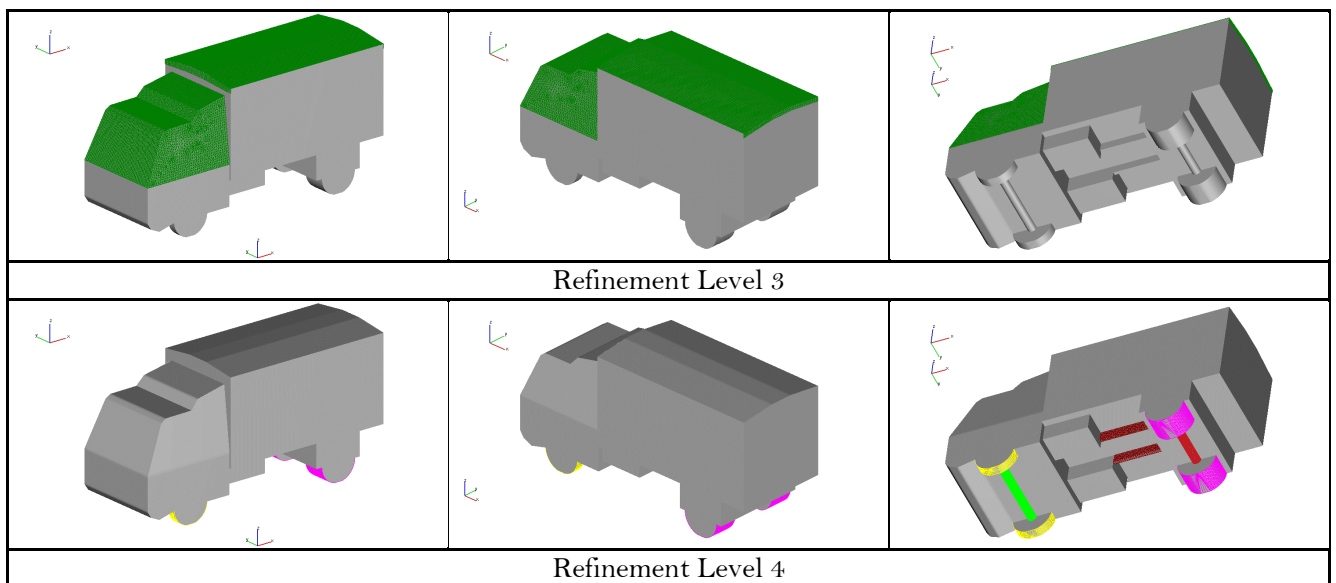
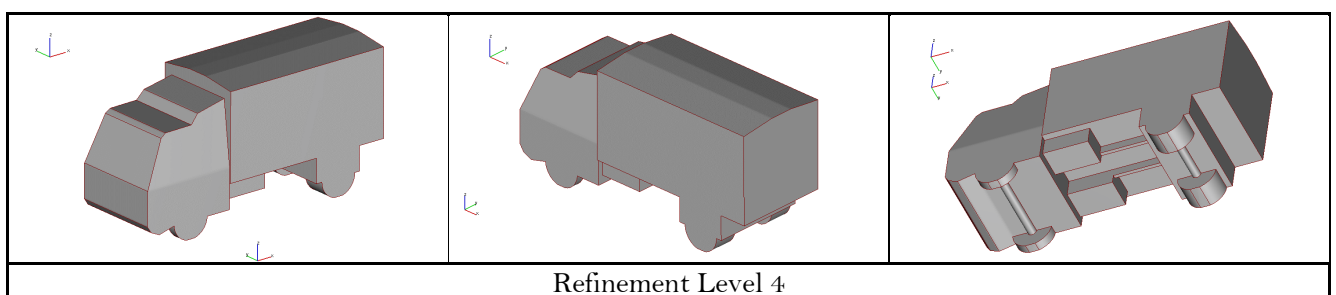


Bild 5.2: *Selections* der Flächenverfeinerung, Stufe ref3, ref4 beim TRUCK.

Das Bild 5.2 zeigt die Verteilung der *Edge Selections* mit dem *Refinement Level 4* und mit dem *Refinement Level 5*, der ausschließlich bei dem feinen Gitter verwendet wurde.



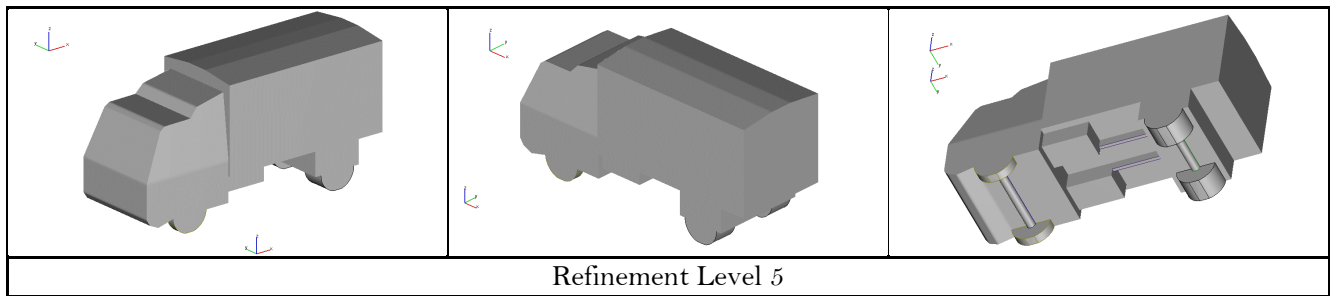
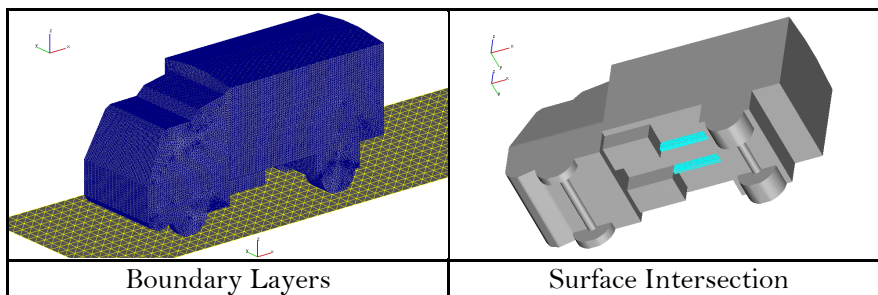


Bild 5.3: *Selections* für Kantenverfeinerung, Stufe re4, ref5 beim TRUCK.

Die Einstellungen für die *Boundary Layers* wurden aus dem Kapitel 4.1 übernommen. Das heißt die ersten Zellen, die kleiner als $0,0001m$ sind, werden auf drei Zellen mit einer Wachstumsrate von 3 geteilt.



Eine grafische Darstellung von den *Surface Selections*, wo die *Boundary Layers* aufgebaut werden, zeigt das Bild 5.4 (links). Sie entstehen auf der ganzen Fahrzeugoberfläche und auf der Fahrbahn. Die Funktion *Surface Intersection* wurde an den Rahmenträgern angewandt. Damit wurde die Durchdringung der Zellen an der schmalen Geometrie verhindert. Den Anwendungsort zeigt das Bild 5.4

Bild 5.4: *Selections* für die *Boundary Layers* Generierung und für die *Surface Intersection* Funktion beim TRUCK.

(rechts). Die Einstellungen der *General Settings* wurden aus dem Gitter *FAME Hexa CAR* mit einzigem Unterschied übernommen, dass die manuelle Eingabe des *Octree Center* nicht benutzt wurde.

Um beide Domänen *FAME Hexa CAR*, *FAME Hexa TRUCK* herum wird wieder wie im Kapitel 4.1 durch die Funktion *Enlarge* in *AVL Fire GUI* ein zum Teil strukturiertes Gitter aufgebaut. Bei einer ausgewählten Position $x/L = 0,39$ werden ebenso zwei Geometrien untersucht. Die rechteckige Domäne ist wieder als IO (*Inlet-Outlet*) bezeichnet. Sie hat gleichen Querschnitt wie der BMW Windkanal und so ist sie $5,77m$ breit und $3,47m$ hoch. Damit der Auslass durch die verwirbelte Strömung nicht gestört wird, ist er weit weg von beiden Fahrzeugmodellen positioniert, die gesamte Länge beträgt $20m$. Aus welchen Bauteilen das fertige Gitter besteht, zeigt die Tabelle 5.4. Die Gitterteile, die aus den *FAME Hexa* Domänen *CAR* und *TRUCK* ausgehen, werden separat generiert und sind als *C (Car)* bzw. *T (Truck)* bezeichnet. Beide Baugruppen werden unabhängig voneinander durch *Connect/Split* \rightarrow *Join Meshes*, *Conform connect* zusammengeklebt. Erst danach werden die beiden Teile C und T zusammengefügt. Diesmal aber nur als *Connect/Split* \rightarrow *Join Meshes* ohne *Conform connect*! So entstehen zwei Wände in der gesamten Domäne, deren Knoten in der x - und z -Richtung unabhängig voneinander liegen. Die Zellflächen der beiden Wände werden durch ein *Interface* miteinander verknüpft: *Connect/Split* \rightarrow *Arbitrary connect*. Diese Vorgehensweise haben beide Gittergeometrien gemeinsam. Bei dem Windkanalnachbau mit Düse, Plenum, Kollektor und mit Abrundungen des Kollektoreintritts bestehen die C und T Baugruppen aus viel mehr Bauteilen. Der Gitteraufbau ist dann ähnlich wie im Kapitel 4.1. Bei den acht Überholpositionen ist die Position des PKW-Modells fixiert. Der Ursprung des Koordinatensystems liegt in der Mitte der Vorderachse des PKW-Modells. Nach der Messung von Schrefl (Schrefl 2008) und der empirischen Gleichung für Grenzschichtdicke bei einer ebenen Platte liegt die Einlassebene und somit der Ursprung der Grenzschicht $7,5m$ vor diesem Punkt. Je nach Überholposition verschiebt sich die *FAME Hexa TRUCK* Domäne relativ zu dem PKW-Modell. Bei bestimmten Positionen verlässt das *FAME Hexa TRUCK* Gitter das Plenum. In solchen Fällen wird das *FAME Hexa TRUCK* Gitter aufgeschnitten, am Rand des Plenums um drei *Boundary Layer* Zellschichten erweitert und der Rest des *FAME Hexa TRUCK* Gitters wird in das Plenum bzw. in die Düse eingearbeitet. Der genaue Vorgang in *AVL Fire GUI* ist ziemlich kompliziert, beinhaltet mehrere Schritte, deswegen wird er hier nicht beschrieben. Tabelle 5.4 zeigt die Abmessungen, die Zellenausgangs- und Zellenendgröße, wo der kleinste Wert die *Max Cell Size* Größe von $0,05m$ darstellt, die reale und verwendete Schichtenanzahl, die Wachstumsrate und die Erweiterungsrichtung der einzelnen Bauteilen. Dabei wurde für die T Baugruppe die Position $x/L = 0,39$ ausgewählt.

Tabelle 5.4: Gitterbauteile der Baugruppen *C* und *T* mit ihren Abmessungen, Zellgrößen und Schichtenanzahl bei ausgewählter Position $x/L = 0,39$.

RealCar_n_Truck_positions										
	Dimensions			Cell Size		Rows	Grow Rate	Direction		
	x [m]	y [m]	z [m]	min [m]	max [m]					
HEXA Car	6	1.5	1.8							
HEXA Truck	8	1.58198	1.8							
front C 1	6.8	2.885	3.47	0.05	0.1	90.67	90	2	x-	
front T 1	7.475	2.885	3.47	0.05	0.1	99.67	99	2	x-	
back C 1	7.2	2.885	3.47	0.05	0.1	96	96	2	x+	
back T 1	4.525	2.885	3.47	0.05	0.1	60.33	60	2	x+	
right T 1	8	1.30302	1.8	0.05	0.08	20.05	20	1.6	y+	
left C 1	6	1.385	1.8	0.05	0.08	21.31	21	1.6	y-	
up C 1	6	2.885	1.67	0.05	0.075	26.72	26	1.5	z+	
up T 1	8	2.885	1.67	0.05	0.075	26.72	26	1.5	z+	
mesh	20	5.77	3.47							
front C 1	4.03	1.5	1.8	0.05	0.1	53.73	54	2	x-	
front T 1	4.705	1.58198	1.8	0.05	0.1	62.73	63	2	x-	
back C 1	1.13	1.5	1.8	0.05	0.05	22.6	23	1	x+	
back T 1	0.208189	1.58198	1.8	3x BL						
right T	1	11.16	0.60302	1.8	0.05	0.08	9.277	10	1.6	y+
	2	11.16	0.16	1.8	0.08	0.08	2	2	1	y+
	3a	10.03	1	1.8	0.08	0.08	12.5	13	1	y+
	3b	1.13	1	1.8	rotate + enlarge + project					
left C	4	11.16	1.13	1.8	0.08	0.16	9.417	9	2	y+
	1	11.16	2.085	1.8	0.05	0.08	32.08	32	1.6	y-
	2	11.16	0.16	1.8	0.08	0.08	2	2	1	y-
	3a	10.03	1	1.8	0.08	0.08	12.5	13	1	y-
up C	3b	1.13	1	1.8	rotate + enlarge + project					
	4	11.16	1.13	1.8	0.08	0.16	9.417	9	2	y-
	1	11.16	5.875	1.67	0.05	0.0755	26.61	27	1.51	z+
	2	11.16	5.875	0.43	0.0755	0.08	5.531	5	1.06	z+
up T	3a	10.03	5.875	1	0.08	0.08	12.5	13	1	z+
	3b	1.13	3.745	1	rotate + enlarge + project					
	3c	1.13	2.13	1	0.08	0.08	12.5	13	1	z+
	4	11.16	5.875	4.1	0.08	0.24	25.63	25	3	z+
nuzzle	1	11.16	4.475	1.67	0.05	0.0755	26.61	27	1.51	z+
	2	11.16	4.475	0.43	0.0755	0.08	5.531	5	1.06	z+
	3a	10.03	4.475	1	0.08	0.08	12.5	13	1	z+
	3b	1.13	2.345	1	rotate + enlarge + project					
collector	3c	1.13	2.13	1	0.08	0.08	12.5	13	1	z+
	4	11.16	4.475	4.1	0.08	0.24	25.63	25	3	z+
	C 1	2.77	3.585	3.47	0.05	0.1	64.93	65	2	x+
mesh	T 1	2.77	2.185							
	C 1	4.87	3.745							
	T 1	1.545		3.9	FAMEHexa cut fit to collector CAR					
T 2	3.325	2.345								
mesh	18.8	10.35	9							

Aus der Tabelle 5.4 ist auch sichtbar, dass das Interface zwischen den *C* und *T* Baugruppen in positiver *y*-Richtung versetzt ist. Die Baugruppe *C* ist im Plenum $5,875m$ breit, während die Baugruppe *T* an dieser Stelle nur $4,475m$ hat. Mit gesamten Abmessungen $x = 18,8m$; $y = 10,35m$; $z = 9m$ stimmt die Domäne des Windkanalnachbaus mit der aus dem Kapitel 4 Umströmung eines realistischen Fahrzeuges (*RealCar*) überein, siehe Bild 5.5.

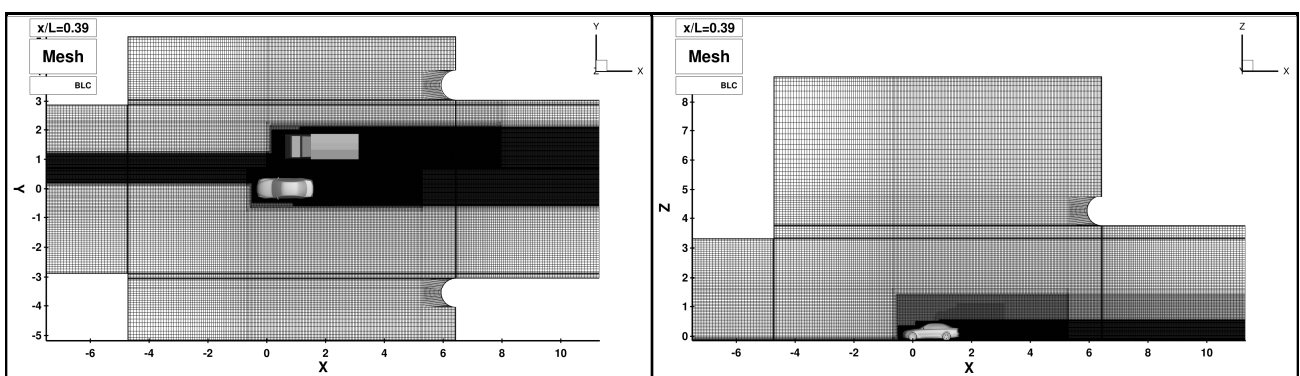


Bild 5.5: Darstellung der Vernetzung und Anordnung bei ausgewählter Position $x/L = 0,39$.

Dieses Interface bilden zwei *Surface Selections* Namen *interface_CAR* und *interface_TRUCK*. Wie schon erwähnt wurde, sollte bei dem kompletten Gitter kein *Conform connect* gemacht werden. Dadurch könnten nämlich die Knoten von Zellen beider Interfaceflächen, die sich mit kleiner als berechneter minimaler Toleranz überlappen, miteinander vereinen. Dies führt dazu, dass die Größen der Interfaceflächen nicht mehr übereinstimmen und

später während der Berechnung eine Fehlermeldung *leaky geometry* folgt. Die Zellenanzahl unterscheidet sich nicht nur zwischen den beiden Interfaceflächen *interface_CAR* und *interface_TRUCK*, sondern auch bei den einzelnen Positionen. Eine Übersicht bietet Tabelle 5.5. Beispielsweise bei dem Gitter *RealCar_n_Truck_W039.flm* der Position $x/L = 0,39$ sind alle Interfaceflächen und deren Einstellungen gezeigt. Das Gitter enthält genauso wie das Gitter aus dem Kapitel 4.1 4 Interfaceflächen *Interface 2,3,4,5* für die Anbringung der Bauelemente (*right T 3b, left C 3b, up C 3b, up T 3b*) der Abrundungen des Kollektoreintritts mit gerundeten Zellschichten an die benachbarten geraden Zellen. Die 5te Interfacefläche *Interface 1* stellt das bereits erwähnte Interface zwischen den *C* und *T* Baugruppen. Weil die Interfaceflächen *Interface 2,3,4,5* bei hier untersuchten Gittern des Windkanalnachbaus immer die gleiche Zellenanzahl haben und identisch sind, wurden sie in der Tabelle 5.5 bei den anderen Gittern weggelassen. Die rechteckigen Gitterdomänen beinhalten nur die Interfacefläche *Interface 1*.

Tabelle 5.5: Liste der in diesem Kapitel verwendeten Interfaces bei allen Positionen, mit dazugehörigen *Selections*, Zellenanzahl und weiteren Einstellungen.

Mesh	Interface				project to interface A	remaining boundary face parts	
	Arbitrary interface	interface A	# cells	interface B			# cells
RealCar_n_Truck_W039.flm	Interface1	interface_CAR	106921	interface_TRUCK	122167	yes	ignore
	Interface2	interface_left-lower	416	interface_left-upper	416	yes	ignore
	Interface3	interface_left-inner	416	interface_left-outer	416	yes	ignore
	Interface4	interface_right-lower	416	interface_right-upper	416	yes	ignore
	Interface5	interface_right-inner	416	interface_right-outer	416	yes	ignore
RealCar_n_Truck_W-160.flm	Interface1 (2,3,4,5)	interface_CAR	106921	interface_TRUCK	129796	yes	ignore
RealCar_n_Truck_W-120.flm	Interface1 (2,3,4,5)	interface_CAR	106921	interface_TRUCK	127502	yes	ignore
RealCar_n_Truck_W-080.flm	Interface1 (2,3,4,5)	interface_CAR	106921	interface_TRUCK	125531	yes	ignore
RealCar_n_Truck_W-040.flm	Interface1 (2,3,4,5)	interface_CAR	106921	interface_TRUCK	123998	yes	ignore
RealCar_n_Truck_W000.flm	Interface1 (2,3,4,5)	interface_CAR	106921	interface_TRUCK	122831	yes	ignore
RealCar_n_Truck-G1-test2_pos039.flm	Interface1	interface_CAR	94173	interface_TRUCK	112003	yes	ignore
RealCar_n_Truck-G1-test6_pos039.flm	Interface1	interface_CAR	94173	interface_TRUCK	112003	yes	ignore
RealCar_n_Truck_W077.flm	Interface1 (2,3,4,5)	interface_CAR	106921	interface_TRUCK	123925	yes	ignore
RealCar_n_Truck_W117.flm	Interface1 (2,3,4,5)	interface_CAR	106921	interface_TRUCK	126220	yes	ignore

In der Tabelle 5.6 sind alle in diesem Kapitel verwendete Gitter. Bei der ausgewählten Position $x/L = 0,39$ wurden 3 Gitter untersucht. Anhand der Gitter *RealCar_n_Truck-G1-test2_pos039.flm* und *RealCar_n_Truck-G1-test6_pos039.flm* wurde eine Gitterstudie durchgeführt. Bei den Gittern *RealCar_n_Truck-G1-test6_pos039.flm* und *RealCar_n_Truck_W039.flm* wurde der Unterschied zwischen der rechteckigen Domäne *IO* und dem Windkanalnachbau untersucht.

Tabelle 5.6: Liste der in diesem Kapitel verwendeten Gitter bei jeder Position mit Zellenanzahl.

Project	Case	Mesh	No. of cells
RealCar_n_Truck_pos-160		RealCar_n_Truck_W-160.flm	47357051
RealCar_n_Truck_pos-120		RealCar_n_Truck_W-120.flm	47033520
RealCar_n_Truck_pos-080		RealCar_n_Truck_W-080.flm	46727502
RealCar_n_Truck_pos-040		RealCar_n_Truck_W-040.flm	46444506
RealCar_n_Truck_pos000		RealCar_n_Truck_W000.flm	46196989
RealCar_n_Truck_pos039-Calculation1 (IO)		RealCar_n_Truck-G1-test2_pos039.flm	48568877
RealCar_n_Truck_pos039-Calculation2 (IO)		RealCar_n_Truck-G1-test6_pos039.flm	42755460
RealCar_n_Truck_pos039-Calculation2		RealCar_n_Truck_W039.flm	46005775
RealCar_n_Truck_pos077		RealCar_n_Truck_W077.flm	45990800
RealCar_n_Truck_pos117		RealCar_n_Truck_W117.flm	46064707

Durch die vereinfachte Vernetzung des LKW-Modells in der *FAME Hexa TRUCK* Domäne konnte das Gitter der rechteckigen Domäne aus 48568877 auf 42755460 Zellen reduziert werden. Bei allen anderen Gittern wurde das reduzierte Gitter *FAMEHexa_TRUCK_G1-test6.flm* der *FAME Hexa TRUCK* Domäne verwendet und die restlichen Überholpositionen wurden nur in dem Windkanalnachbau simuliert. Das Gitter des Windkanalnachbaus hat im Vergleich mit der rechteckigen Domäne der gleichen Position $x/L = 0,39$ um 3250315 Zellen mehr. Bei den Überholpositionen, wo das LKW- vor dem PKW-Modell steht, wird der Nachlauf hinter dem LKW-Modell, wo er mit dem PKW-Modell angrenzt, extra durch dichtere Zellschichten verfeinert. Deswegen bei den Gittern des Windkanalnachbaus variiert die Zellenanzahl zwischen den einzelnen Überholpositionen von etwa 46 bis 47 Millionen Zellen.

Bei Simulation der Grenzschichtabsaugung in dem Nachbau des BMW Windkanals wird die gleiche Position und Größe der Absaugungs- und Zuführungsfläche wie im Kapitel 4 Umströmung eines realistischen Fahrzeuges (*RealCar*) benutzt. Die Absaugungsfläche befindet sich nach dem Düsenaustritt und hat die Maße $5,77m \times 1,04294m$. Die Zuführungsfläche, wo die Luftmenge wieder zugefügt wird, liegt im Kollektor und ist $6,09m \times 0,94122m$ groß.

5.2. Ergebnisauswertung und Diskussion

Die Auswertung der Ergebnisse wird wieder in zwei Unterkapitel aufgeteilt. Als Erstes werden die Simulationsergebnisse aus den acht diskreten Überholpositionen strömungstechnisch betrachtet. Danach wird die Rechenleistung einzelner Simulationen und die verwendete Hardware bewertet.

5.2.1. Strömungstechnische Auswertung

Der Überholvorgang wurde in den acht diskreten Positionen $x/L = -1,60; -1,20; -0,80; -0,40; 0,00; 0,39; 0,77; 1,17$ untersucht. Die Länge L ist dabei die LKW-Länge welche $L = 2,5m$ beträgt. Bei der Position $x/L = 0,00$ ist die PKW- und LKW-Nase auf der gleichen Höhe. Die Entfernung zwischen beiden Fahrzeugmodellen bleibt während allen Berechnungen bei $\Delta y = 0,6m$. Das Bild 5.6 zeigt die exakten Überholpositionen des PKW-Modells gegenüber dem LKW-Modell.

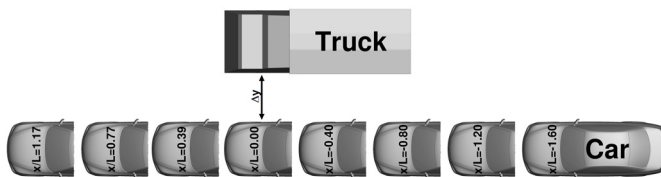


Bild 5.6: Positionierung PKW-LKW in 8 diskreten Positionen des Überholvorgangs.

Die ausgewählte Position $x/L = 0,39$ wurde ausführlicher untersucht. Zuerst wurde eine kleine Gitterstudie durchgeführt. Dabei wurde getestet, ob das grob vernetzte LKW-Modell in der *FAME Hexa TRUCK* Domäne keine Auswirkungen auf die Luftwiderstandbeiwerte hat. Danach wurde wieder die rechteckige *IO* Domäne mit dem Nachbau des BMW Windkanals verglichen. Anschließend wurde in dem Windkanalnachbau die Auswirkung der Grenzschichtabsaugung *BLC* untersucht. Jede andere Überholposition wurde im Gitter des Windkanalnachbaus mit der Grenzschichtabsaugung *BLC* simuliert und besteht jeweils aus drei Simulationen mit unterschiedlichen Turbulenzmodellen.

5.2.1.1. Gitterstudie, Position $x/L = 0,39$

Um Zellen zu sparen und den Rechenaufwand zu verkleinern, wird ein gröberes Gitter bei dem LKW-Modell bevorzugt. Die Gitterstudie hat als Ziel festzustellen, ob diese Maßnahme keine Auswirkung auf die Luftwiderstände, vor allem auf die Luftwiderstände des PKW-Modells, hat. Das feine Gitter *RealCar_n_Truck-G1-test6_pos039.flm* beinhaltet die *FAME Hexa TRUCK* Domäne *FAMEHexa_TRUCK_G1-test2.flm* bei deren Vernetzung aus den Einstellungen für die *FAME Hexa CAR* Domäne ausgegangen wurde. Sie wurde in der Berechnung *RealCar_n_Truck_pos039-Calculation1* verwendet und in dem Case *Wheels_IO-RANS* mit dem RANS Modell simuliert. Bei dem gröberen Gitter wurden in der *FAME Hexa TRUCK* Domäne die Flächen des LKW-Modells durch ein gröberes *Refinement Level 2* verfeinert. Zusätzlich wurde bei den *Surface* und *Edge Selections* die Verfeinerungsdicke des *Refinement Level 4* auf $0,00625m$ verkleinert und auf das *Refinement Level 5* der *Edge Selections* verzichtet. Diese Berechnung wird als *RealCar_n_Truck_pos039-Calculation2* bezeichnet und wurde mit allen drei Turbulenzmodellen (RANS, URANS, PANS) simuliert. Bei beiden Gittern handelt es sich nach der Case-Beschriftung um die rechteckige *IO* Domäne ohne Grenzschichtabsaugung. Den Verlauf der Luftwiderstände zeigt das Bild 5.7.

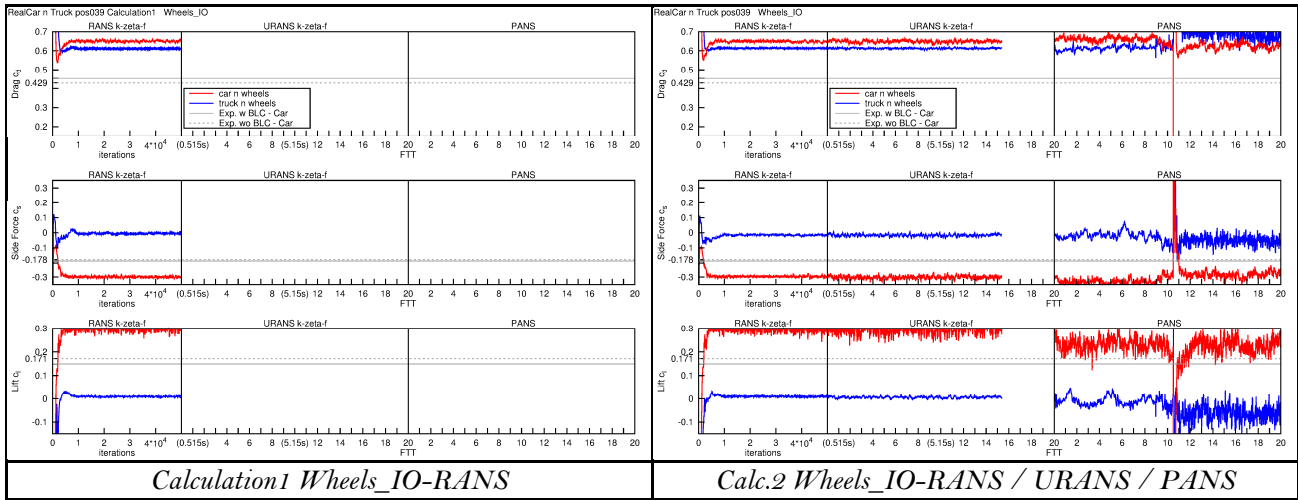


Bild 5.7: Verläufe des Luftwiderstands c_d , der Seitenkraft c_s , des Auftriebs c_l des PKWs und LKWs bei der Gitterstudie in rechteckiger Domäne ohne Grenzschichtabsaugung BLC .

Hier zeigen beide RANS Simulationen ein ähnliches Verhalten. In der Tabelle 5.7 sind dann gemittelte Werte des Luftwiderstandes c_d , der Seitenkraft c_s und des Auftriebs c_l sowohl für das PKW- als auch für das LKW-Modell eingetragen.

Tabelle 5.7: *Realcar_n_Truck* - Luftwiderstandsbeiwerte vom PKW (mit Rädern) und vom LKW in der Position $x/L = 0,39$.

Project	pos. x/L	Case	Solver	car_n_wheels:cD:-	car_n_wheels:cS:-	car_n_wheels:cL:-	LKW:cD:-	LKW:cS:-	LKW:cL:-
	0.39	Exp.	w BLC	0.4530	-0.18700	0.1490			
			wo BLC	0.4290	-0.17800	0.1710			
RealCar_n_Truck-Calculation1	0.39	Wheels_IO	RANS	0.6505	-0.29881	0.2983	0.6115	-0.00510	0.0092
			RANS	0.6492	-0.29601	0.2952	0.6135	-0.01518	0.0095
			URANS	0.6489	-0.30149	0.2941	0.6130	-0.01654	0.0062
			PANS	0.6355	-0.29602	0.2245	0.6662	-0.04321	-0.0445
			RANS	0.5417	-0.28485	0.2933	0.5349	-0.07140	0.0426
RealCar_n_Truck-Calculation2	0.39	Wheels	URANS	0.5588	-0.28474	0.2797	0.5519	-0.07964	0.0397
			RANS	0.5609	-0.29439	0.2200	0.5456	-0.00503	-0.0267
		Wheels-BLC	RANS	0.5228	-0.26674	0.1890	0.5712	-0.14149	0.0008
			URANS	0.5334	-0.27861	0.1884	0.5509	-0.07048	0.0478
			PANS	0.5386	-0.26780	0.1547	0.5450	0.02035	-0.0568

Bei beiden RANS Simulationen *RealCar_n_Truck_pos039-Calculation1* und *RealCar_n_Truck_pos039-Calculation2* weisen die Luftwiderstände des PKW- und LKW-Modells sehr gute Übereinstimmungen auf. Die Seitenkraft c_s des LKW-Modells zeigt zwar eine leichte Abweichung, jedoch nur bei ihrem niedrigen Wert. Als nächstes Kontrollkriterium werden die Momentenbeiwerte miteinander verglichen. Deren Verlauf über die Iterationen bzw. Zeitschritte zeigt das Bild 5.8.

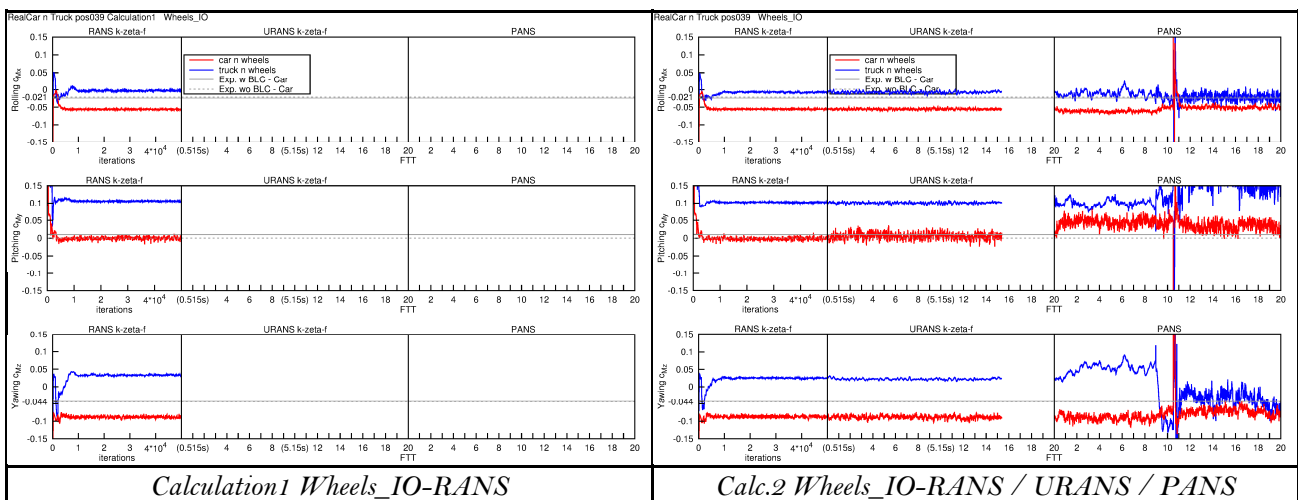


Bild 5.8: Verläufe des Rollmomentbeiwerts c_{M_x} , Nickmomentbeiwerts c_{M_y} , des Giermomentbeiwerts c_{M_z} des PKWs und LKWs bei der Gitterstudie in rechteckiger Domäne ohne BLC .

Die Verläufe des Rollmomentbeiwerts c_{M_x} , Nickmomentbeiwerts c_{M_y} und des Giermomentbeiwerts c_{M_z} haben bei beiden RANS Simulationen einen ähnlichen Charakter. In der Tabelle 5.8 sind wieder die gemittelten Werte eingetragen. Bei dem LKW-Modell sind kleine Abweichungen der Momentenbeiwerte vorhanden. Sie stellen aber keinen Grund dar, das grobe Gitter nicht anzuwenden.

Tabelle 5.8: *Realcar_n_Truck* - Momentenbeiwerte vom PKW (mit Rädern) und vom LKW in der Position $x/L = 0,39$.

Project	pos. x/L	Case	Solver	car_n_wheels:cMx:-	car_n_wheels:cMy:-	car_n_wheels:cMz:-	LKW:cMx:-	LKW:cMy:-	LKW:cMz:-
	0.39	Exp.	w BLC	-0.0240	0.01000	-0.0430			
		Exp.	wo BLC	-0.0210	0.00000	-0.0440			
RealCar_n_Truck-Calculation1	0.39	Wheels_IO	RANS	-0.0559	-0.00008	-0.0885	-0.0030	0.10574	0.0329
			RANS	-0.0554	-0.00123	-0.0874	-0.0072	0.10229	0.0252
			URANS	-0.0554	0.00605	-0.0886	-0.0073	0.10083	0.0223
			PANS	-0.0530	0.03817	-0.0789	-0.0190	0.14248	-0.0162
			RANS	-0.0543	-0.01577	-0.0790	-0.0245	0.09631	-0.0564
			URANS	-0.0550	-0.00262	-0.0805	-0.0254	0.10077	-0.0824
		Wheels	RANS	-0.0547	0.02200	-0.0707	-0.0015	0.11163	0.0270
			RANS	-0.0492	0.02224	-0.0633	-0.0474	0.06945	-0.1572
			URANS	-0.0521	0.02537	-0.0699	-0.0186	0.09977	-0.0965
			PANS	-0.0480	0.03732	-0.0690	0.0096	0.09523	0.0138
			RANS	-0.0492	0.02224	-0.0633	-0.0474	0.06945	-0.1572
			URANS	-0.0521	0.02537	-0.0699	-0.0186	0.09977	-0.0965

Eine grafische Übersicht über die gemittelten Luftwiderstands- und Momentenbeiwerte bei beiden Fahrzeugmodellen in den RANS Simulationen mit unterschiedlichen Gittern illustriert das Bild 5.9. Hier ist deutlich, dass aus der Sicht der Luftwiderstände und Momente das Gitter mit gröber vernetztem LKW-Modell verwendet werden kann. Die Übereinstimmung der Luftwiderstände und Momente bei dem LKW-Modell zwischen beiden Gittern ist zufriedenstellend. Es gibt auch keine negative Auswirkung auf das PKW-Modell, was durch eine sehr gute Übereinstimmung der Luftwiderstände und Momente bei dem PKW-Modell bewiesen ist. Beim Vergleich mit experimentellen Daten herrscht bei der RANS Simulation eine große Abweichung. Es ist aber von Bedeutung, dass die Orientation (das Vorzeichen) des Moments zwischen Simulation und Experiment übereinstimmt.

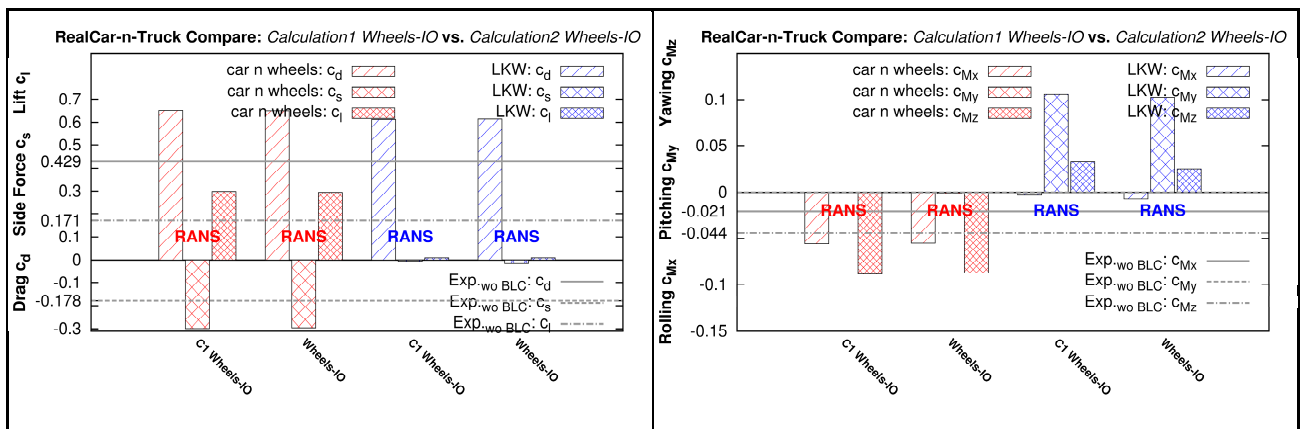


Bild 5.9: Histogramme der Luftwiderstands- und Momentenbeiwerte des PKWs (mit Rädern) und LKWs bei der Gitterstudie in rechteckiger Domäne ohne BLC in der Position $x/L = 0,39$.

Die Druckverteilung an der rechten zum LKW-Modell angelegten Fahrzeugseite unterstreicht, dass keine negative Auswirkung auf das PKW-Modell vorhanden ist. Der Druckkoeffizient in den Messpunkten ist bei beiden Fällen identisch. Eine grafische Darstellung zeigt das Bild 5.10.

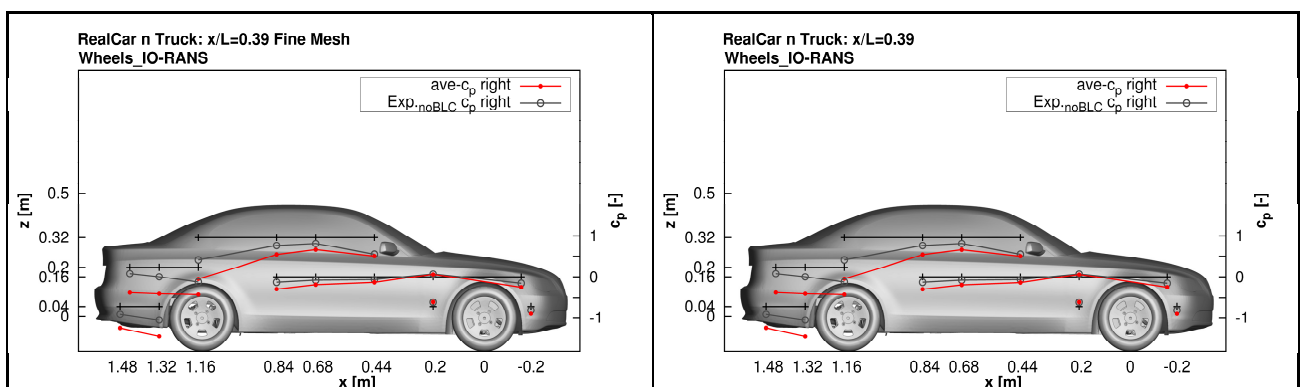


Bild 5.10: Werte des gemittelten Druckbeiwerts c_p auf der rechten PKW-Seite bei der Gitterstudie in rechteckiger Domäne ohne *BLC* in der Position $x/L = 0,39$.

Die Verteilung der Strömungsgeschwindigkeit um das LKW-Modell ist ebenso in beiden Fällen fast identisch (siehe Bild 5.11). Im Fokus steht die unmittelbare Nähe des LKW-Modells, wo die Strömung durch das gröbere Gitter verändert werden könnte. In dem Schnitt durch die z -Ebene $z = 0,08m$ sind keine Veränderungen der Umströmung sichtbar. Die Größe der Ablösungen neben und hinter dem LKW-Modell bleibt gleich.

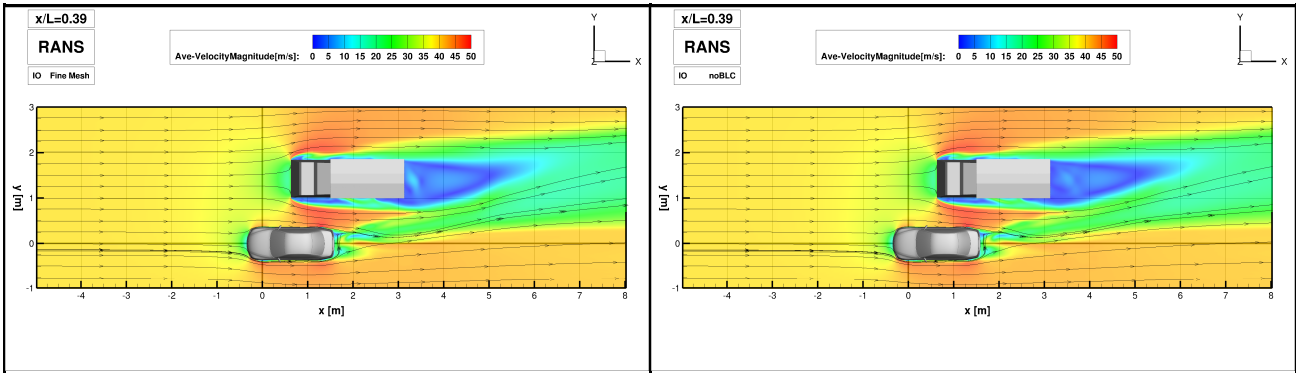


Bild 5.11: Vergleich der gemittelten Geschwindigkeit in der horizontalen Ebene $z = 0,08m$ bei der Gitterstudie in rechteckiger Domäne ohne *BLC* in der Position $x/L = 0,39$.

Nach Betrachtung der Luftwiderstände und Momente an beiden Fahrzeugoberflächen, der Druckverteilung an der PKW-Oberfläche und der nahliegenden Umströmung wurde durch die Gitterstudie bewiesen, dass die Anwendung der größeren *FAME Hexa TRUCK* Domäne im *FAMEHexa_TRUCK_G1-test2.flm* Gitter bei weiteren Simulationen legitim ist. In dieser Hinsicht besteht keine Gitterabhängigkeit. Der einzige Unterschied zwischen den zwei Gittern stellt der dimensionslose Wandabstand y^+ dar (siehe Bild 5.12). Weil aus dem *Refinement Level 3* mit Zellengröße $0,00625m$ auf den *Refinement Level 2* mit Zellengröße $0,0125m$ zurückgegangen ist, hat sich der y^+ Wert auf der LKW-Oberfläche dazu entsprechend verdoppelt. Der Maximalwert beträgt $y^+_{max} = 67$ und somit liegt der erste wandnahe Zellmittelpunkt in dem logarithmischen Bereich.

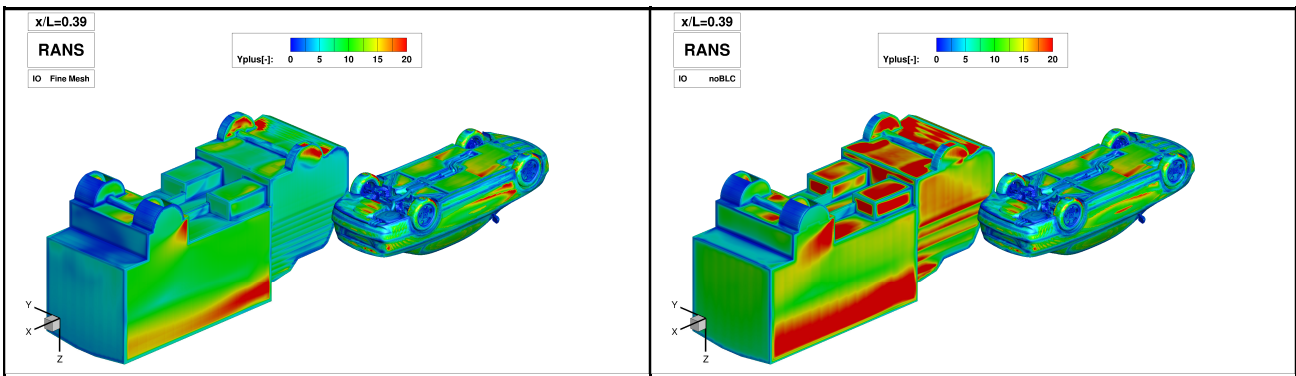


Bild 5.12: Vergleich des y^+ -Wertes auf der PKW- und LKW-Oberfläche bei der Gitterstudie in rechteckiger Domäne ohne *BLC* in der Position $x/L = 0,39$.

5.2.1.2. Einfluss des Windkanals und der Grenzschichtabsaugung *BLC*

Ebenso wie im Kapitel 4.2.1.3 wurde auch der Überholvorgang mit unterschiedlichen Gittern simuliert und mit experimentellen Daten von Schrefl (Schrefl 2008) verglichen. Dafür wurde wieder die Position $x/L = 0,39$ ausgewählt. Zuerst wurde die rechteckige Simulationsdomäne mit dem Nachbau des BMW-Windkanals verglichen. Anschließend wurde in dem Windkanalnachbau die Grenzschichtabsaugung *BLC* (*boundary layer control*) untersucht. Bei allen Fällen wurde die Rotation der Räder vernachlässigt. Die Cases, die als *IO* (*Inlet*, *Outlet*) bezeichnet wurden, stellen die rechteckige Domäne dar. Cases ohne *IO* entsprechen dann dem Windkanalnachbau mit seiner Düse, seinem Kollektor und seinem Plenum. Die Grenzschichtabsaugung ist bei dem Windkanal-Gitter durch eine Auslassebene nach dem Düsenaustritt simuliert. Die Tabellen Tabelle 5.7

und Tabelle 5.8 zeigen die gemittelten Werte vom Luftwiderstandsbeiwert c_d , dem Seitenkraftbeiwert c_s , dem Auftriebsbeiwert c_l , dem Rollmomentbeiwert c_{M_x} , dem Nickmomentbeiwert c_{M_y} und dem Giermomentbeiwert c_{M_z} für das PKW-Modell mit Rädern (*Selection: car_n_wheels*) und für das LKW-Modell (*Selection: LKW*) aus allen durchgeführten Simulationen. Die grüne Farbe repräsentiert die Simulationen und Messungen mit Grenzschichtabsaugung *BLC*, blau gefärbt sind die Werte ohne *BLC*.

Der Iterations- bzw. Zeitverlauf der Luftwiderstandsbeiwerte c_d , c_s , c_l lässt sich anhand des Bild 5.7 (rechts) bei der rechteckigen IO Domäne beobachten. Bild 5.13 zeigt dann Simulationen des Windkanalnachbaus ohne (links) und mit der Grenzschichtabsaugung *BLC* (rechts).

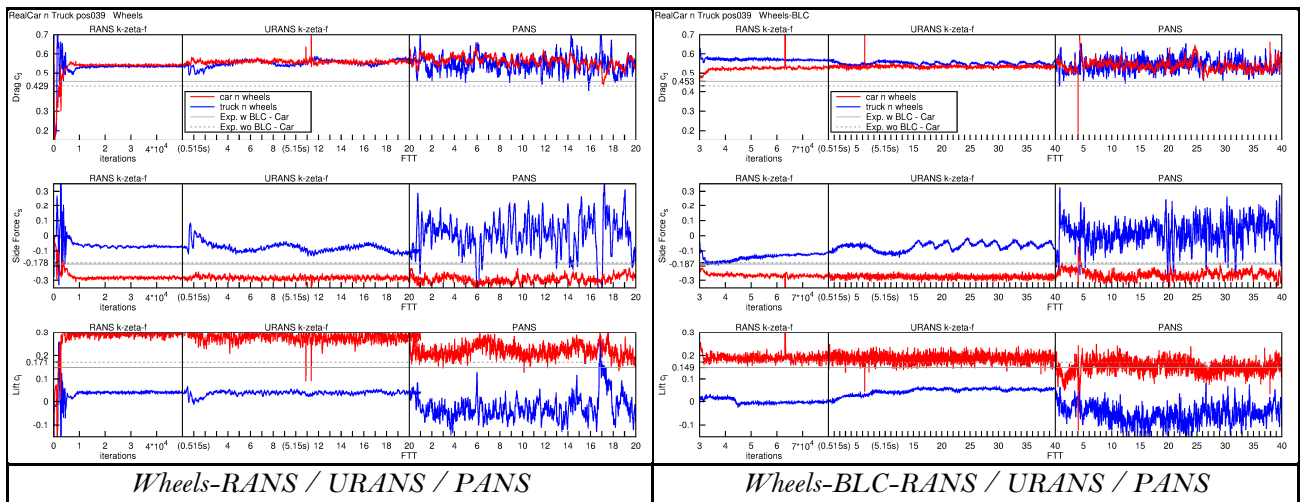


Bild 5.13: Verläufe des Luftwiderstands c_d , der Seitenkraft c_s , des Auftriebs c_l des PKWs und LKWs bei dem Windkanalnachbau mit und ohne *BLC* in der Position $x/L = 0,39$.

Bei den Cases *Wheels_IO*- und *Wheels*- wurden die stationären RANS Simulationen 50000 Iterationen berechnet. Die instationären URANS und PANS Simulationen wurden über eine Zeit von 20 FTTs simuliert. Der Case *Wheels-BLC*- wurde ausgewählt und länger berechnet. Bei RANS wurden das 80000 Iterationen, bei URANS und PANS doppelt so lang also 40 FTTs. Auch in diesem Kapitel wurde zuerst die RANS Simulation gestartet. Mit diesen Ergebnissen wurde anschließend die URANS Simulation initialisiert. Als letztes wurde die PANS Simulation aus den URANS Ergebnissen ohne zeitliche Angabe (in *AVL Fire GUI: Restart without time information*) gestartet. Aus den Verläufen lässt sich beobachten, dass die Luftwiderstände bei den RANS Simulationen, die mit der maximalen Einlassgeschwindigkeit initialisiert wurden, sich schon nach zirka 1000 Iterationen stabilisieren. Wäre das Strömungsfeld aus Nullgeschwindigkeit initialisiert, würde es deutlich länger dauern, bis sich die Luftwiderstände auf einem konstanten Wert stabilisieren. Danach tendieren die RANS Simulationen zu einer konstanten stationären Lösung; sie sind nicht in der Lage die Oszillationen der Umströmung wiederzugeben. Den URANS Simulationen gelingt es nur teilweise die periodischen Ablösungen und Strömungsozillationen wiederzugeben; dabei werden nur die Grobstrukturen modelliert.

Sie oszillieren dann mit langen Perioden, die sich über mehrere FTTs erstrecken. An langen scharfen Kanten des LKW-Modells lösen sich große Wirbel ab. Der Ablösungspunkt ist durch die scharfe Kante fest definiert. Somit entstehen ausgeprägte Ablösungen, die durch die stärkere Oszillation der Luftwiderstände zu identifizieren sind. Bei dem PKW-Modell entstehen die Ablösungen eher an abgerundeten Kanten, wo der Ablösepunkt nicht fest fixiert ist. Die Wechselwirkung zwischen zwei gegenrotierenden Wirbeln und damit auch die Oszillation sind schwächer ausgeprägt. Die URANS Simulation braucht eine bestimmte Simulationszeit bis sie sich aus dem stationären in den instationären Modus umschaltet. Wenn die PANS Simulation durch das URANS-Feld initialisiert wird, fehlt in der Backup-Datei unter anderem das Feld der gemittelten Geschwindigkeit, aus der sich die fluktuierende Geschwindigkeit berechnet, die die aufgelöste turbulente kinetische Energie darstellt, durch die dann der f_k -Parameter festgestellt wird. Bis sich das Feld der gemittelten Geschwindigkeit aufbaut und die PANS Simulation ordentlich funktioniert, wird wieder eine gewisse Simulationszeit benötigt. Die PANS Simulation kann auch kleinere Wirbelstrukturen auflösen, die durch die lokalen Schwankungen repräsentiert sind. Die Oszillationen mit einer langen Periode stellen wieder große Wirbelstrukturen dar. Bei dem ausgewählten Case *Wheels-BLC*- der Position $x/L = 0,39$ wurden die URANS

und PANS Simulationen doppelt so lang über 40 FTTs simuliert, um die Oszillationen über längere Zeit zu beobachten. Dabei hat es sich erwiesen, dass der Auftrieb bei der PANS Simulation mit sehr langer Periode schwanken kann.

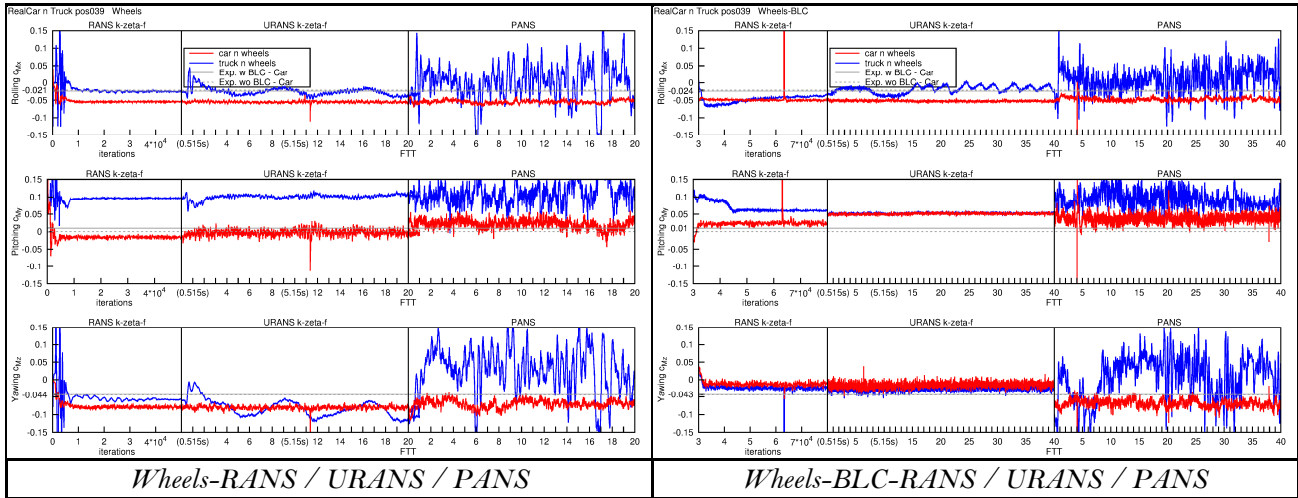
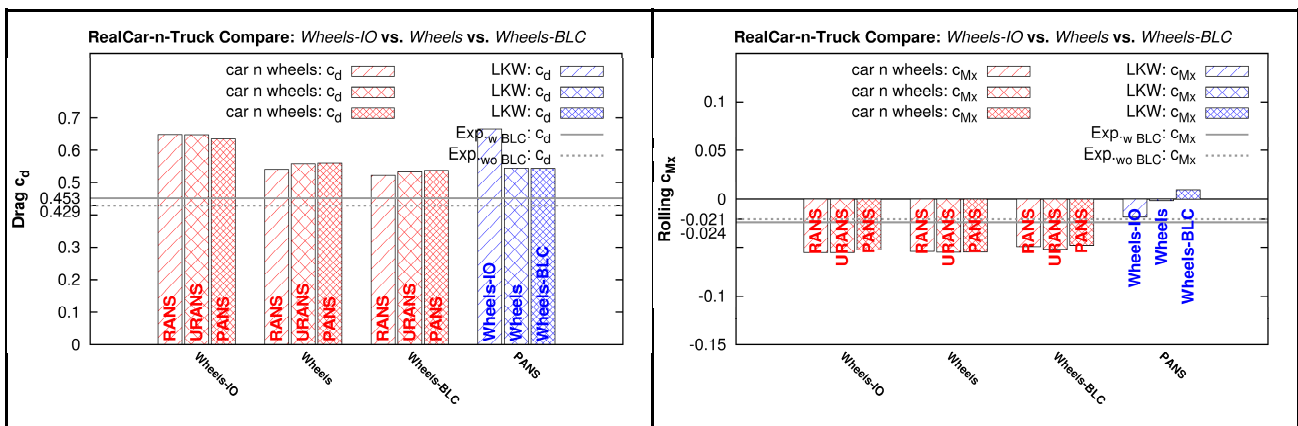


Bild 5.14: Verläufe des Rollmomentbeiwerts c_{M_x} , Nickmomentbeiwerts c_{M_y} , des Giermomentbeiwerts c_{M_z} des PKWs und LKWs bei dem Windkanalnachbau mit und ohne *BLC* in der Position $x/L = 0,39$.

Die Momentenbeiwerte, die auf den Bildern Bild 5.8 (rechts) und Bild 5.14 zu sehen sind, erreichen kleinere Werte als die Luftwiderstandsbeiwerte. Auf der abgerundeten PKW-Oberfläche oszillieren sie nur wenig. Der Verlauf der Momentenbeiwerte ist an der kantigen LKW-Oberfläche mit stärkeren Schwankungen verbunden. Der Rollmomentbeiwert c_{M_x} verhält sich genauso wie der Seitenkraftbeiwert c_s . Bei der PANS Simulation sind wieder sowohl lokale Schwankungen als auch längere periodische Oszillationen vorhanden. Die gemittelten Luftwiderstandsbeiwerte c_d , c_s , c_l und die Momentenbeiwerte c_{M_x} , c_{M_y} , c_{M_z} aus durchgeführten Simulationen mit verwendeten Turbulenzmodellen werden auf dem Bild 5.15 miteinander verglichen. Auf den Grafen sind immer drei Simulationen aufgetragen. Als erstes die Simulation *Wheels_IO*- der rechteckigen Domäne ohne Grenzschichtabsaugung *BLC*. Danach folgt die Simulation des Windkanalnachbaus *Wheels*- ohne Grenzschichtabsaugung *BLC* und anschließend die Simulation *Wheels-BLC*- mit der Grenzschichtabsaugung *BLC*. Die Luftwiderstandsbeiwerte c_d , c_s , c_l bzw. die Momentenbeiwerte c_{M_x} , c_{M_y} , c_{M_z} des PKW-Modells inklusive Räder (*Selection: car_n_wheels*) sind rot gefärbt. Blau sind die Luftwiderstandsbeiwerte bzw. Momentenbeiwerte des LKW-Modells (*Selection: LKW*) nur aus den Cases mit PANS Turbulenzmodell aller drei Simulationen gezeichnet.



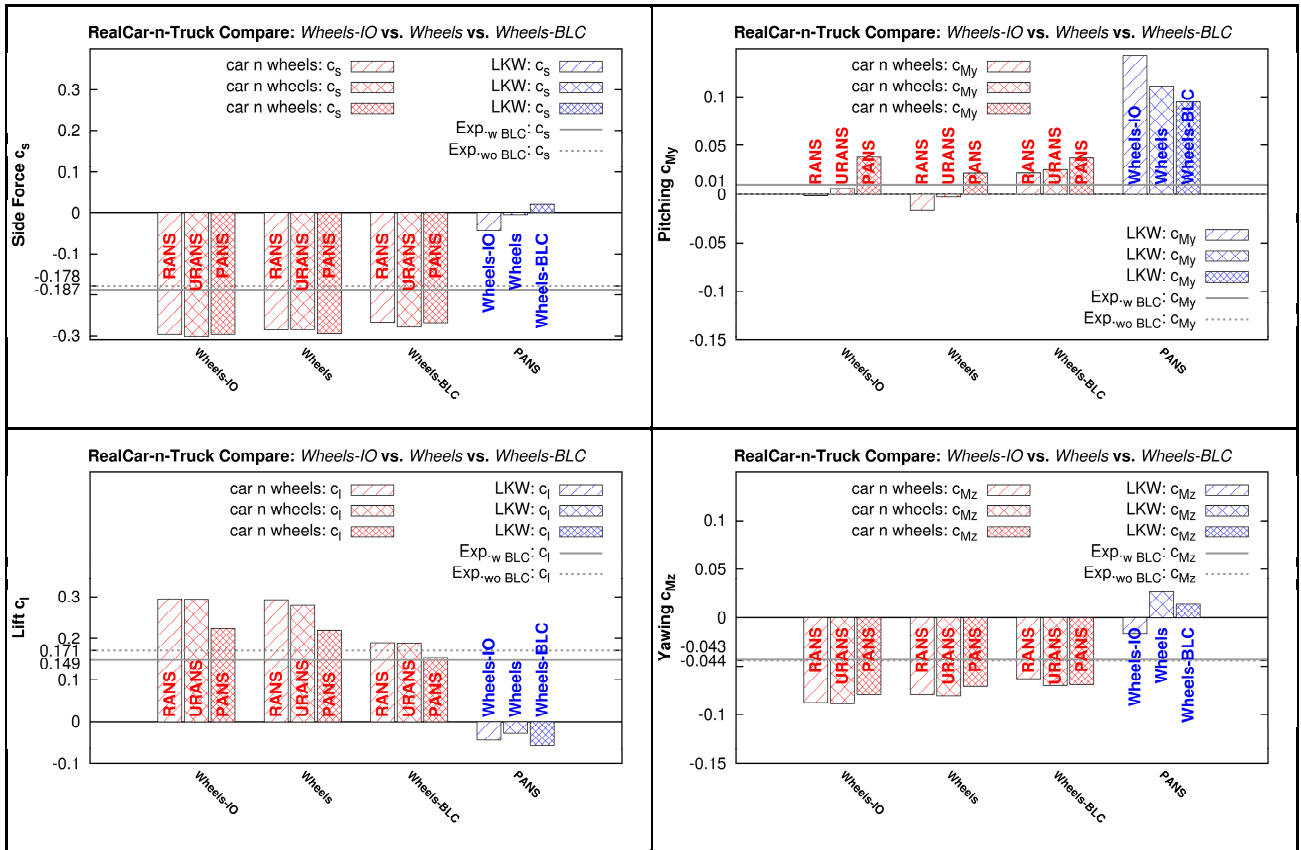


Bild 5.15: Histogramm des Luftwiderstands c_d , Seitenkraft c_s , Auftriebs c_l , des Roll- c_{M_x} , Nick- c_{M_y} und Gierrmomentbeiwerts c_{M_z} des PKWs (mit Rädern) und LKWs bei rechteckiger Domäne und dem Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung *BLC* in der Position $x/L = 0,39$.

Der Luftwiderstand c_d und die Seitenkraft c_s wurden in dieser Position $x/L = 0,39$ bei allen drei Simulationen überschätzt. Die Wechselwirkung zwischen den Fahrzeugmodellen ist bei der Simulation *Wheels-IO*-am stärksten. Der aus dem Kapitel 4.2.1.3 bekannte Trend zwischen RANS, URANS und PANS wird hier nicht verfolgt. Durch die bessere Strömungsabbildung bei URANS und PANS wird der Fehler verkleinert, deswegen sinkt der Luftwiderstand c_d von RANS zu PANS. Durch die Aufweitung des Freistrahls in dem Windkanalnachbau wird der Luftwiderstand c_d kleiner als in der rechteckigen Domäne. Bei der Domäne mit nachgebautem Windkanal setzt sich wieder der Trend durch, dass die stationäre RANS Simulation die instationäre Fahrzeugumströmung nicht korrekt wiedergeben kann. Die instationären Wirbelstrukturen im Nachlauf, die hauptsächlich für den Luftwiderstand c_d verantwortlich sind, werden durch das instationäre URANS Verfahren genauer modelliert. Das PANS Verfahren, das die turbulenten Strukturen zum Teil auflöst, liefert die besten Ergebnisse. Die experimentelle Beobachtung, dass sich bei der Grenzschichtabsaugung *BLC* der Luftwiderstand c_d erhöht, konnte auch bei Simulationen dieser Position nicht reproduziert werden. Auf den Luftwiderstand c_d des LKW-Modells hat die Grenzschichtabsaugung *BLC* fast keine Auswirkung. Das liegt daran, dass die Stirnfläche des LKW-Modells relativ hoch positioniert ist. Dank einer sehr langen Oszillationsperiode ist es schwer die Seitenkraft c_s zwischen den Simulationsverfahren zu vergleichen. Eine Erhöhung der Seitenkraft c_s bei der Grenzschichtabsaugung *BLC*, die beim Experiment auftritt, lässt sich bei den Simulationen nicht feststellen. Ein interessantes Verhalten lässt sich bei der Seitenkraft c_s des LKW-Modells beobachten: Bei der PANS Simulation ändert sie ihre Vorzeichen. Ob eine positive oder negative Seitenkraft c_s korrekt ist, lässt sich nicht feststellen, weil keine Messdaten vorliegen. Was den Auftrieb c_l des PKW-Modells angeht, wird er bei den RANS und URANS Simulationen überschätzt. Durch die Verwendung des Windkanalnachbaus konnte der Auftrieb c_l im Vergleich zu der rechteckigen Domäne abgesenkt werden. Durch die Grenzschichtabsaugung *BLC* konnte wie im Experiment eine weitere Reduzierung erreicht werden. Die Werte des Auftriebs c_l bei den PANS Simulationen erzielen eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment. Das LKW-Modell zeichnet sich bei allen drei Simulationen durch einen negativen Auftrieb c_l bzw. durch Abtrieb aus. Dank der vereinfachten Geometrie auf dem Chassis ist die Strömung unterhalb schneller als oberhalb des LKW-Modells.

Das Rollmoment c_{M_x} ist zu der Seitenkraft c_s ähnlich. Das Rollmoment c_{M_x} , das auf die PKW-Oberfläche wirkt, wird überschätzt. Bei der Grenzschichtabsaugung *BLC* verhält er sich umgekehrt zum Experiment. Bei dem Nickmoment c_{M_y} ist vor allem wichtig, dass seine Orientation mit dem Experiment übereinstimmt. Er nimmt bei dem PKW-Modell sehr kleine Werte an. Deswegen ist es schwierig ihn bei der Simulation zu treffen. Bei der Grenzschichtabsaugung *BLC* sollte das Nickmoment c_{M_y} laut Experiment positiv werden. Dies wurde auch bei allen drei Simulationsverfahren erreicht. Das Giermoment c_{M_z} des PKW-Modells wird wieder überschätzt. Nur bei den PANS Simulationen bleibt er wie im Experiment durch die Grenzschichtabsaugung *BLC* fast unbeeinflusst. Das Giermoment c_{M_z} , das auf die LKW-Oberfläche wirkt, ändert zwischen der rechteckigen Domäne und dem Windkanalnachbau seine Orientation. Daraus lassen sich erste mögliche Interferenzen mit dem Windkanal ableiten.

Ein weiteres wichtiges Vergleichskriterium stellt die Druckverteilung auf der PKW-Oberfläche dar. Beim Experiment (Schrefl 2008) wurde die Druckdifferenz in 54 Punkten gemessen. Für weitere Details zu der Messmethode siehe Kapitel 4.2.1.3. Die Messpunkte sind auf der Fahrzeugoberseite auf zwei symmetrischen Ebenen $y = -0,16m$, $y = 0,16m$ und auf dem Unterboden auf einer Zentralebene $y = 0m$ eingeordnet. Ein Messpunkt befindet sich auf dem Bug in der Zentralebene $y = 0m$ in Höhe von $z = 0,04m$. Auf dem Heck liegen zwei Messpunkte mit den Koordinaten $y = -0,16m$, $y = 0,16m$ und $z = 0,16m$. Auf den Fahrzeugseiten sind die Messpunkte auf den vier horizontalen Ebenen $z = 0,04m$, $z = 0,16m$, $z = 0,2m$ und $z = 0,32m$ eingeordnet. Die Tatsache, dass beim Experiment zur Berechnung des Druckbeiwertes c_p die Druckdifferenz auf den Punkt 33 im Bug bezogen wurde, ist bei einem Überholvorgang, wo die Fahrzeugumströmung während der Überholung asymmetrisch ist, mit noch größeren Abweichungen verbunden, als bei einer symmetrischen Umströmung eines Solofahrzeugs. Wie der Vergleich der Luftwiderstands- und der Momentenbeiwerte gezeigt hat, wird die beste Übereinstimmung mit den experimentellen Daten bei den PANS Simulationen erreicht. Deswegen wird der folgende Druckverlauf nur zwischen den PANS Simulationen verglichen. Bild 5.16 zeigt den gemittelten Druckbeiwert *ave* c_p entlang den verschiedenen Ebenen auf der Fahrzeugoberseite und auf dem Unterboden für alle drei Simulationen im Vergleich mit experimentellen Werten in den entsprechenden Messpunkten.

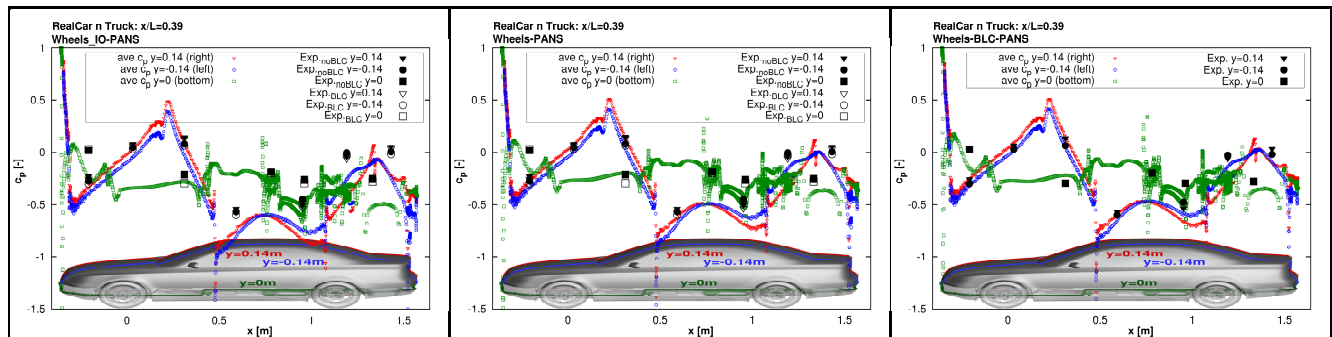


Bild 5.16: Vergleich des Druckverlaufs auf der Ober- und Unterseite des PKWs in der rechteckigen Domäne und im Windkanalnachbau mit und ohne *BLC* in der Position $x/L = 0,39$.

Eine Simulation im Vergleich zum Experiment ermöglicht den Druckbeiwert c_p in jeder Stelle auszuwerten. Am Fahrzeugbug entsteht ein Staupunkt mit $c_p = 1$. Danach sinkt der Druck bis zur maximalen Beschleunigung der Strömung an der konkaven Abrundung der Motorhaube. Entlang der Motorhaube wird die Strömung wieder langsamer während der Druck zunimmt. An der Motorhaubenkante löst sich die Strömung ab, im Windlauf bildet sich eine Rezirkulationszone und der Druck erreicht sein lokales Maximum. Der sinkende Druck auf der Frontscheibe weist auf eine Beschleunigung der Strömung hin. An den Abrundungen zwischen Dach und Front- bzw. Heckscheibe entstehen die größten Unterdruckspitzen. Durch den großen Radius auf dem Dach verlangsamt sich die Strömung, gefolgt von einem lokalen Druckanstieg. An der Heckscheibe steigt der Druck bis zu einer Ablösung zwischen Heckscheibe und Kofferraumdeckel. Die Strömung legt sich später an der Heckklappe wieder an, damit sie sich an dem Heckspoiler von der Fahrzeugoberfläche endgültig verabschiedet und in das Totwasser abfließt. Im Vergleich zu dem Solofahrzeug aus dem Kapitel 4.2.1.3 treten bei dieser Überholposition auf der linken und rechten Fahrzeughälfte unterschiedliche Drücke auf. Auf der Fahrzeugunterseite wird die Strömung zuerst durch den Frontdiffusor beschleunigt. Auf dem geraden Unterboden wird sie wieder etwas verlangsamt und löst sich in dem Mitteltunnel

ab. Die Umströmung der Abgasanlage und des Differentials ist ebenso mit zahlreichen kleinen Ablösungen verbunden. Auf der Reserveradmulde beschleunigt die Strömung wieder und der Druck nimmt ab. Auf dem Heckdiffusor verlässt die Strömung unter einem bestimmten Winkel, der die Größe der Ablöseblase und somit des Luftwiderstands mitbestimmt, die Fahrzeugoberfläche. Zusammenaddiert ist der Druck auf der Oberseite höher als auf der Unterseite, was zur Folge den positiven Auftrieb c_l hat. Dank dem Druckverlust bei einer reibungsbehafteten Strömung steigt der Druck nicht mehr auf $c_p = 1$. Hinter dem Fahrzeug bildet sich eine Rezirkulationszone, die den größten Anteil an dem Luftwiderstand c_d hat.

Beim Angehalten der Skala für den ganzen Verlauf des Druckbeiwerts c_p sind die Unterschiede zwischen den Simulationen deutlich kleiner. Bei einer grafischen Darstellung würden sich die Verläufe überlappen. Deswegen wurde die Simulation *Wheels-PANS* als Referenzsimulation ausgewählt, während die anderen in Form einer Differenz zu ihr dargestellt werden.

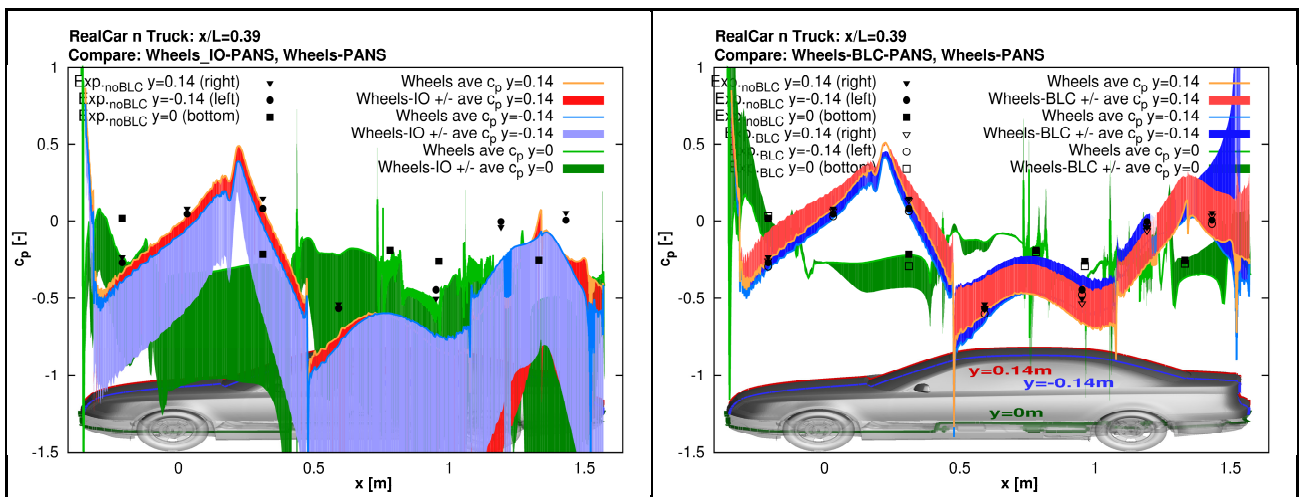


Bild 5.17: Differenz des gemittelten Druckbeiwerts c_p auf der Ober- und Unterseite des PKWs zwischen der rechteckigen Domäne und dem Windkanalnachbau mit und ohne *BLC* in $x/L = 0,39$.

Das Bild 5.17 links zeigt den Vergleich zwischen der rechteckigen Domäne *Wheels_IO-PANS* und dem nachgebauten Windkanal *Wheels-PANS*. Während der Druckverlauf auf der Fahrzeugoberfläche bei dem Solofahrzeug (siehe Kapitel 4.2.1.3, Bild 4.14) geringe Abweichung aufgewiesen hat, ist bei dieser Überholposition der Druck entlang des ganzen Verlaufs in der rechteckigen Domäne deutlich niedriger als in dem Windkanalnachbau. Die Strömung um das PKW-Modell ist im Allgemeinen schneller, was auch mit dem höheren Luftwiderstand c_d im Fall der rechteckigen Domäne *Wheels_IO-* übereinstimmt (siehe Bild 5.15). Besonders in dem hinteren Teil des PKW-Modells, da wo sich bei dieser Position quasi das LKW-Modell befindet, zeigt die Simulation der rechteckigen Domäne niedrigere Druckwerte im Vergleich mit dem Experiment. Warum jetzt der Unterschied zwischen beiden Rechendomänen größer als beim Solofahrzeug aus Kapitel 4.2.1.3 ist, kann an den Interferenzen zwischen dem LKW-Modell und dem Windkanal liegen. Die Auswirkung der Grenzschichtabsaugung *BLC* in dem Windkanalnachbau ist auf dem Bild 5.17 rechts gezeigt. Nach der experimentellen Beobachtung wird der Druck durch die Grenzschichtabsaugung *BLC* außer auf dem Frontdiffusor in allen hier abgebildeten Messpunkten kleiner. Dieses Verhalten kann außer dem Frontdiffusor und dem vorderen Teil des Unterbodens bei der Simulation nicht wiedergegeben werden. Diese Tendenz stimmt mit der bei dem Solofahrzeug aus Kapitel 4.2.1.3 überein. Bei der Simulation wird der Druck auf der Fahrzeugoberseite nach der Grenzschichtabsaugung *BLC* höher, die Geschwindigkeit also kleiner. Dazu wird der Druck auf der linken Seite der Heckklappe höher als auf der rechten Seite. Es kommt zu einer Verlangsamung der Strömung, die von links kommt. Bei einer größeren Druckerhöhung auf der Oberseite als auf der Unterseite sinkt der Auftrieb c_l , was auch das Bild 5.15 beweist.

Außer der Druckverteilung auf der Ober- und Unterseite des PKW-Modells ist bei einem Überholvorgang die Druckverteilung an den Fahrzeugseiten von Bedeutung. Die erste Reihe auf dem Bild 5.18 zeigt die zu dem LKW-Modell abgewandte (linke) Seite des PKW-Modells. In der zweiten Reihe ist dann die zugewandte (rechte) Seite. Die Messpunkte und die Messebene sind schwarz markiert und entsprechen gleichzeitig dem Wert $c_p = 0$. Die Messergebnisse werden grau und die Simulationsdaten farbig dargestellt.

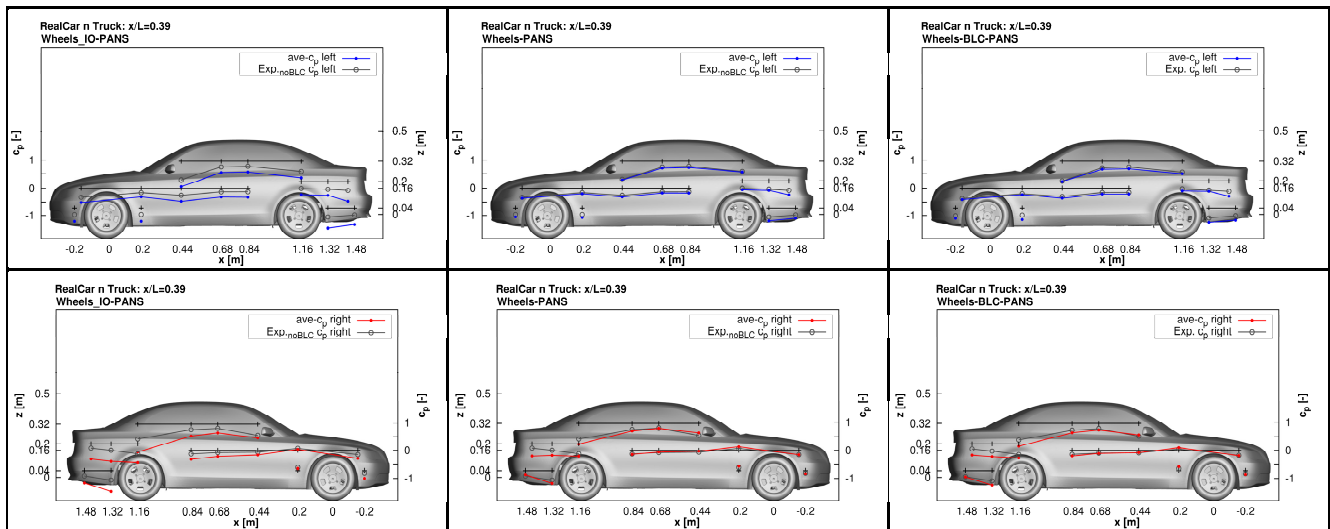


Bild 5.18: Werte des gemittelten Druckbeiwerts c_p in Messpunkten auf der rechten und linken PKW-Seite in der rechteckigen Domäne und im Windkanalnachbau mit und ohne BLC bei $x/L = 0,39$.

Die Druckverteilung auf der abgewandten Seite im Fall der rechteckigen Domäne *Wheels_IO-PANS* zeigt wieder allgemein niedrigere Werte als die experimentellen Daten. Eine bessere Übereinstimmung mit dem Experiment liefert die Simulation *Wheels-PANS* des Windkanalnachbaus. Genauso eine gute Übereinstimmung bietet auch die Simulation *Wheels-BLC-PANS* mit der Grenzschichtabsaugung BLC. Einzige kleine Abweichungen entstehen bei der Radumströmung und im Heckbereich, wo die Strömung etwas mehr beschleunigt wird. Bei der rechten, an das LKW-Modell zugewandten Seite, entstehen bei der rechteckigen Domäne die größten Abweichungen von dem Experiment in dem Bereich, wo das LKW-Modell zu dem PKW-Modell bei dieser Position anliegt. Eine deutliche Verbesserung zeigen die beiden Simulationen *Wheels-PANS* und *Wheels-BLC-PANS*, die den Windkanal umfassen. Eine kleine Abweichung von den experimentellen Daten entsteht wieder auf dem Fahrzeugheck, wo die Strömung etwas mehr beschleunigt wird. Die Umströmung der Räder wird hier genau getroffen. Als letzter Druckvergleich wird der gemittelte Druckbeiwert c_p in der horizontalen Ebene $z = 0,08m$ auf dem Bild 5.19 gezeigt.

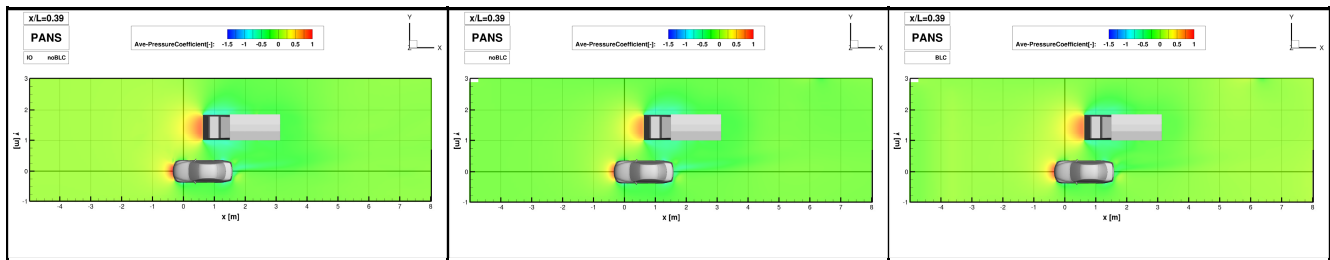


Bild 5.19: Vergleich des gemittelten Druckbeiwerts c_p in der horizontalen Ebene $z = 0,08m$ in der rechteckigen Domäne und im Windkanalnachbau mit und ohne BLC in der Position $x/L = 0,39$.

Bei der Simulation *Wheels_IO-PANS* und *Wheels-PANS* ist ein Unterdruck bei der Wechselwirkung zwischen beiden Fahrzeugmodellen sichtbar. Hinter dem PKW-Modell befindet sich ein gut sichtbarer Unterdruckbereich, der in Richtung des LKW-Modells tendiert. Durch die Grenzschichtabsaugung BLC bei der Simulation *Wheels-BLC-PANS* wird der Unterdruck bei der Wechselwirkung schwächer und das Unterdruckgebiet hinter dem PKW-Modell schwächer ausgeprägt. Ein kleiner Druckgradient vor und hinter dem PKW-Modell geht Hand in Hand mit dem niedrigsten Luftwiderstand c_d bei dieser Simulation, was auch das Bild 5.15 beweist.

Laut der Bernoulli-Gleichung hängt der Druck mit der Geschwindigkeit zusammen. Die Geschwindigkeitsverteilung wird auf dem Bild 5.20 mit Hilfe der gemittelten Geschwindigkeitskomponente u in den gesamten Rechendomänen dargestellt.

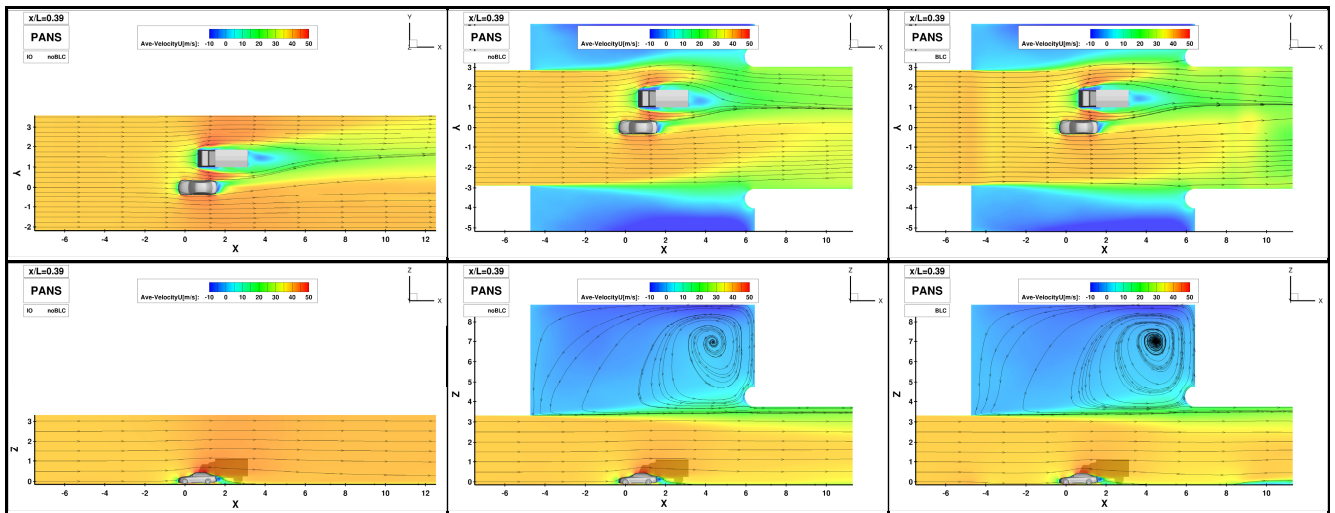


Bild 5.20: Vergleich der gemittelten U -Geschwindigkeit in der horizontalen Ebene $z = 0,08m$ und im Längsmittelschnitt in der rechteckigen Domäne und im Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung BLC in der Position $x/L = 0,39$.

Die erste Reihe des Bildes zeigt die horizontale Ebene $z = 0,08m$ ($0,08m$ über die Vorderachse wo sich Ursprung des Koordinatensystems befindet). In der rechteckigen Domäne *Wheels_IO-PANS* beschleunigt sich die Strömung in der Blockierung, die durch die Fahrzeugmodelle verursacht wird, schneller als in dem Windkanalnachbau *Wheels-PANS* und *Wheels-BLC-PANS*. Die Versperrung φ als ein Verhältnis zwischen den Projektionsflächen beider Fahrzeuge A zur Querschnittsfläche des Düsenaustritts A_N beträgt bei dem Überholvorgang: $\varphi = A/A_N = (0,351 + 1,012)/20,022 = 0,068$. Bei einer Freistrahlsströmung weicht die Strömung aus und vermischt sich mit ruhender Luft im Plenum. Dabei verliert sie an ihrer Geschwindigkeit. Durch die Querschnittsvergrößerung im Kollektor wird die Strömung weiter abgeschwächt. In dem Raum zwischen beiden Fahrzeugmodellen herrscht bei der rechteckigen Domäne wieder eine größere Geschwindigkeit als in dem Windkanalnachbau. Durch diese Beobachtung einer schnelleren Umströmung haben sich die Ergebnisse wie der größere Luftwiderstand c_d und die Abweichungen bei der Druckverteilung an den beiden Fahrzeugseiten bei der rechteckigen Domäne *Wheels_IO-PANS* untermauert. Dank der exzentrischen Position des LKW-Modells in der Windkanal-domäne wird die Strömung an der rechten Seite durch die Vermischung mit der ruhenden Luft deutlich abgeschwächt und verursacht damit im Vergleich zu der rechteckigen Domäne eine umgekehrte Orientierung des LKW-Giermoments c_{M_z} . Die Grenzschichtabsaugung BLC hat in dieser Höhe keine signifikante Auswirkung auf die Geschwindigkeitsverteilung.

Die gemittelte Geschwindigkeitskomponente u in der mittleren y -Ebene $y = 0$ ist in der zweiten Reihe gezeigt. In der rechteckigen Domäne kommt es wieder zu einer Beschleunigung der Strömung oberhalb der beiden Fahrzeugmodelle, während bei dem Windkanalnachbau eine Vermischung im Plenum und eine Ausdehnung der Strömung im Kollektor entsteht. Durch die Verlangsamung der Strömung oberhalb des Fahrzeuges sinkt der Auftrieb c_l bei dem PKW-Modell in der Simulation *Wheels-PANS*. Die unterste Stromlinie, die aus der Düse kommt, wird nach der Grenzschichtabsaugung BLC nach unten umgelenkt, was eine Verkleinerung der Grenzschicht signalisiert. Bei einer kleineren Grenzschicht wird die Strömung unter dem Fahrzeug schneller und dadurch wird der Auftrieb c_l weiter reduziert.

Anhand aller Ergebnisse und des Vergleichs mit dem Experiment wird die Windkanal-domäne vor der rechteckigen Domäne bei Berechnungen der restlichen Überholpositionen bevorzugt.

5.2.1.3. Untersuchung einzelner Überholpositionen

In diesem Abschnitt werden die acht diskreten Positionen ausführlich diskutiert und anschließend miteinander verglichen. Die Überholpositionen werden in der Reihenfolge angeordnet, in der das PKW-Modell an dem LKW-Modell vorbeifährt. Dazu sind die entsprechenden Bezeichnungen zugeordnet: $x/L = -1,60; -1,20; -0,80; -0,40; 0,00; 0,39; 0,77; 1,17$. Bei relevanten Fällen wird das Solofahrzeug aus dem Kapitel 4 Umströmung eines realistischen Fahrzeuges (*RealCar*), zur Darstellung der Situation, in der das PKW-Modell weit entfernt und durch das LKW-Modell nicht gestört ist, in Vergleich dazu gestellt. Die Berechnung der einzelnen Positionen erfolgt ausschließlich in der Windkanal-domäne mit der Grenzschichtabsaugung BLC .

Außer der Position $x/L = 0,39$ wurden die experimentellen Messungen der einzelnen Überholpositionen nur bei eingeschalteter Grenzschichtabsaugung *BLC* durchgeführt. Zu den einzelnen Positionen kommt noch die Auswertung der drei RANS, URANS und PANS Simulationsverfahren.

Wie bereits erwähnt, wurde bei der experimentellen Untersuchung die Position des PKW-Modells fixiert und nur das LKW-Modell gegenüber entsprechend positioniert. So fängt der Überholvorgang an der Position an, an der das LKW-Modell sehr nah zum Düsenaustritt positioniert ist. Die Position $x/L = -1,60$ entspricht einer Entfernung von $x = -4m$; die LKW-Front liegt $4m$ vor dem PKW-Modell. Die nächste Position $x/L = -1,20$ entspricht der Entfernung $x = -3m$, der LKW-Front befindet sich $3m$ vor dem PKW-Modell. Bei der nächsten Position $x/L = -0,80$ treffen beide Fahrzeugmodelle aufeinander. Die LKW-Front liegt in $x = -2m$ bzw. $2m$ vor dem PKW-Modell, während sich die PKW-Front im Heckbereich des LKW-Modells befindet. Die weitere Position $x/L = -0,40$ hat die Koordinate $x = -1m$ und ist die letzte Position, an der die LKW-Front, in diesem Fall $1m$, vor dem PKW liegt. Bei der Position $x/L = 0,00$ und Koordinate $x = 0m$ liegt die LKW- und PKW-Front auf gleicher Höhe. Bei der nächsten Position $x/L = 0,39$ liegt die LKW-Front auf der Höhe der PKW-Halblänge, die sich in $x = 0,968m$ befindet. Die Position $x/L = 0,77$ ist die erste Position, an der das PKW-Modell gerade das LKW-Modell verlassen hat. Die LKW-Front liegt auf Höhe des PKW-Hecks in $x = 1,936m$. Bei der letzten Position $x/L = 1,17$ wandert das LKW-Modell nah zu dem Kollektoreintritt. Die LKW-Front liegt $1m$ hinter dem PKW-Modell mit der Koordinate $x = 2,936m$.

Tabelle 5.9: *Realcar_n_Truck* - Luftwiderstandsbeiwerte vom PKW (mit Rädern) und vom LKW bei RANS, URANS, PANS Verfahren in allen Positionen der Überholung.

pos. x/L	Case	Solver	car_n_wheels:cD:-	car_n_wheels:cS:-	car_n_wheels:cL:-	LKW:cD:-	LKW:cS:-	LKW:cL:-
-1.60	Exp.	w BLC	0.3130	-0.07700	0.1320			
	Wheels-BLC	RANS	0.2512	0.00871	0.2157	0.5809	-0.06431	-0.0182
		URANS	0.2718	-0.02328	0.1902	0.5883	-0.07201	-0.0219
		PANS	0.2909	-0.01475	0.1668	0.6098	-0.11938	-0.0866
-1.20	Exp.	w BLC	0.2470	0.05100	0.1350			
	Wheels-BLC	RANS	0.2262	0.06874	0.2255	0.5926	0.00482	0.0029
		URANS	0.2498	0.06460	0.1850	0.6004	0.00601	-0.0104
		PANS	0.2388	0.08999	0.1672	0.6194	-0.01531	-0.0432
-0.80	Exp.	w BLC	0.2440	0.08600	0.1520			
	Wheels-BLC	RANS	0.2371	0.01903	0.2131	0.5785	0.04148	0.0024
		URANS	0.2400	0.02168	0.1773	0.5793	0.03297	0.0006
		PANS	0.2161	0.09645	0.1541	0.6194	0.09271	-0.0542
-0.40	Exp.	w BLC	0.3180	-0.02900	0.1720			
	Wheels-BLC	RANS	0.2903	-0.10045	0.2653	0.5590	0.01712	0.0435
		URANS	0.2738	-0.06210	0.2433	0.5592	-0.01166	0.0241
		PANS	0.2491	0.00844	0.1550	0.6364	0.08658	-0.0598
0.00	Exp.	w BLC	0.3830	-0.04900	0.1520			
	Wheels-BLC	RANS	0.3659	-0.06632	0.2388	0.5881	-0.17860	0.0387
		URANS	0.3623	-0.04744	0.2396	0.5836	-0.16655	0.0381
		PANS	0.3524	-0.01238	0.1437	0.5933	0.01586	-0.0587
0.39	Exp.	w BLC	0.4530	-0.18700	0.1490			
	Wheels-BLC	RANS	0.5228	-0.26674	0.1890	0.5712	-0.14149	0.0008
		URANS	0.5334	-0.27861	0.1884	0.5509	-0.07048	0.0478
		PANS	0.5386	-0.26780	0.1547	0.5450	0.02035	-0.0568
0.77	Exp.	w BLC	0.3500	-0.19800	0.1300			
	Wheels-BLC	RANS	0.3316	-0.19386	0.2250	0.5572	-0.13909	0.0264
		URANS	0.3232	-0.17039	0.1973	0.5766	-0.17308	0.0030
		PANS	0.3417	-0.20414	0.1751	0.5068	0.03129	-0.0256
1.17	Exp.	w BLC	0.2560	-0.04800	0.1130			
	Wheels-BLC	RANS	0.2206	-0.01376	0.2014	0.5423	-0.11978	0.0187
		URANS	0.2205	-0.01824	0.1644	0.5311	-0.09558	0.0231
		PANS	0.2292	-0.01479	0.1346	0.5541	0.00033	-0.0355

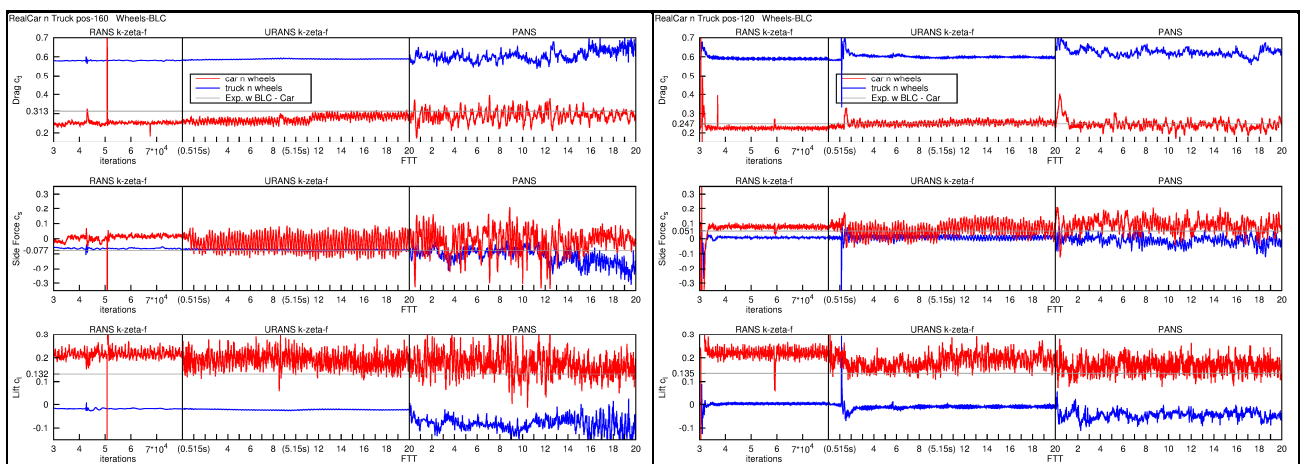
Die Tabelle 5.9 zeigt die gemittelten Werte vom Luftwiderstandsbeiwert c_d , vom Seitenkraftbeiwert c_s und vom Auftriebsbeiwert c_l für das PKW-Modell mit Rädern (*Selection: car_n_wheels*) und für das LKW-Modell (*Selection: LKW*). Dabei werden bei allen Überholpositionen die Messergebnisse mit den Simulationsdaten aller drei Verfahren für den Fall mit der Grenzschichtabsaugung *BLC* (grüne Farbe) miteinander verglichen.

Den Rollmomentbeiwert c_{M_x} , den Nickmomentbeiwert c_{M_y} und den Giermomentbeiwert c_{M_z} aus der Messung und aus den Simulationen für die *Selections car_n_wheels* und *LKW* fasst dann die Tabelle 5.10 zusammen. Weder die Luftwiderstände noch die Momente des LKW-Modells wurden experimentell untersucht.

Tabelle 5.10: *Realcar_n_Truck* - Momentenbeiwerte vom PKW (mit Rädern) und vom LKW bei RANS, URANS, PANS Verfahren in allen Positionen der Überholung.

pos. x/L	Case	Solver	car_n_wheels:cMx:-	car_n_wheels:cMy:-	car_n_wheels:cMz:-	LKW:cMx:-	LKW:cMy:-	LKW:cMz:-
-1.60	Exp.	w BLC	-0.0140	-0.02700	0.0140			
	Wheels-BLC	RANS	-0.0002	-0.07109	-0.0025	-0.0321	0.01477	-0.1649
		URANS	-0.0091	-0.05969	0.0113	-0.0353	0.00440	-0.1916
		PANS	-0.0052	-0.03662	-0.0121	-0.0535	-0.20390	-0.3946
-1.20	Exp.	w BLC	0.0100	-0.05800	0.0270			
	Wheels-BLC	RANS	0.0147	-0.07334	0.0015	0.0017	0.12131	0.0121
		URANS	0.0124	-0.06410	0.0177	0.0022	0.08634	0.0165
		PANS	0.0177	-0.06441	0.0087	-0.0059	0.00119	-0.0708
-0.80	Exp.	w BLC	0.0220	-0.05400	0.0050			
	Wheels-BLC	RANS	0.0050	-0.06980	0.0035	0.0232	0.11142	0.0332
		URANS	0.0029	-0.05854	0.0081	0.0190	0.10848	0.0157
		PANS	0.0236	-0.07023	0.0030	0.0383	0.00531	0.1838
-0.40	Exp.	w BLC	-0.0010	-0.02800	-0.0020			
	Wheels-BLC	RANS	-0.0225	-0.04734	0.0106	0.0142	0.16813	-0.0366
		URANS	-0.0166	-0.05608	0.0105	0.0025	0.13684	-0.0842
		PANS	0.0032	-0.04569	0.0200	0.0370	0.05363	0.1718
0.00	Exp.	w BLC	-0.0020	-0.01700	-0.0150			
	Wheels-BLC	RANS	-0.0077	-0.04534	-0.0007	-0.0644	0.14033	-0.3098
		URANS	-0.0047	-0.04849	-0.0100	-0.0580	0.13696	-0.2924
		PANS	0.0085	-0.02812	-0.0173	0.0090	0.08226	0.0380
0.39	Exp.	w BLC	-0.0240	0.01000	-0.0430			
	Wheels-BLC	RANS	-0.0492	0.02224	-0.0633	-0.0474	0.06945	-0.1572
		URANS	-0.0521	0.02537	-0.0699	-0.0186	0.09977	-0.0965
		PANS	-0.0480	0.03732	-0.0690	0.0096	0.09523	0.0138
0.77	Exp.	w BLC	-0.0350	-0.00900	0.0170			
	Wheels-BLC	RANS	-0.0476	-0.03954	-0.0059	-0.0482	0.08753	-0.0850
		URANS	-0.0419	-0.02755	-0.0189	-0.0592	0.09773	-0.0788
		PANS	-0.0479	-0.01892	-0.0175	0.0126	0.08771	0.0149
1.17	Exp.	w BLC	-0.0060	-0.03200	0.0080			
	Wheels-BLC	RANS	-0.0012	-0.07215	-0.0119	-0.0397	0.06647	-0.0138
		URANS	-0.0023	-0.06377	-0.0135	-0.0300	0.05922	-0.0225
		PANS	-0.0007	-0.05713	-0.0212	0.0022	0.14614	0.0267

Alle RANS Simulationen wurden 80000 Iterationen berechnet, wobei erst ab 30000 Iterationen gemittelt wurde. Außer bei der Position $x/L = 0,39$ wurden die URANS und PANS Simulationen bei allen anderen Positionen über 20 FTTs berechnet. Alle URANS Simulationen wurden über die gesamte Zeit gemittelt. Nach der Initialisierung der PANS Simulation aus dem URANS-Feld muss sich zuerst das neu gemittelte Geschwindigkeitsfeld entwickeln, damit die PANS Simulation bzw. der f_k -Parameter richtig funktioniert. Aus diesem Grund wurden alle PANS Simulationen erst nach 5 FTTs ($t = 2,575s$) gemittelt. Weil die Stabilisierung der Luftwiderstände bzw. Momente in den Anfangsiterationen für die grafische Darstellung nicht von Bedeutung ist, wurden ebenso wie bei der Mittelung die ersten 30000 Iterationen abgeschnitten. Eine grafische Darstellung der Luftwiderstandsbeiwerte c_d , c_s und c_l über die Iterationen bzw. Zeitschritte bei den RANS, URANS und PANS Simulationen in den einzelnen Überholpositionen zeigt das Bild 5.21.



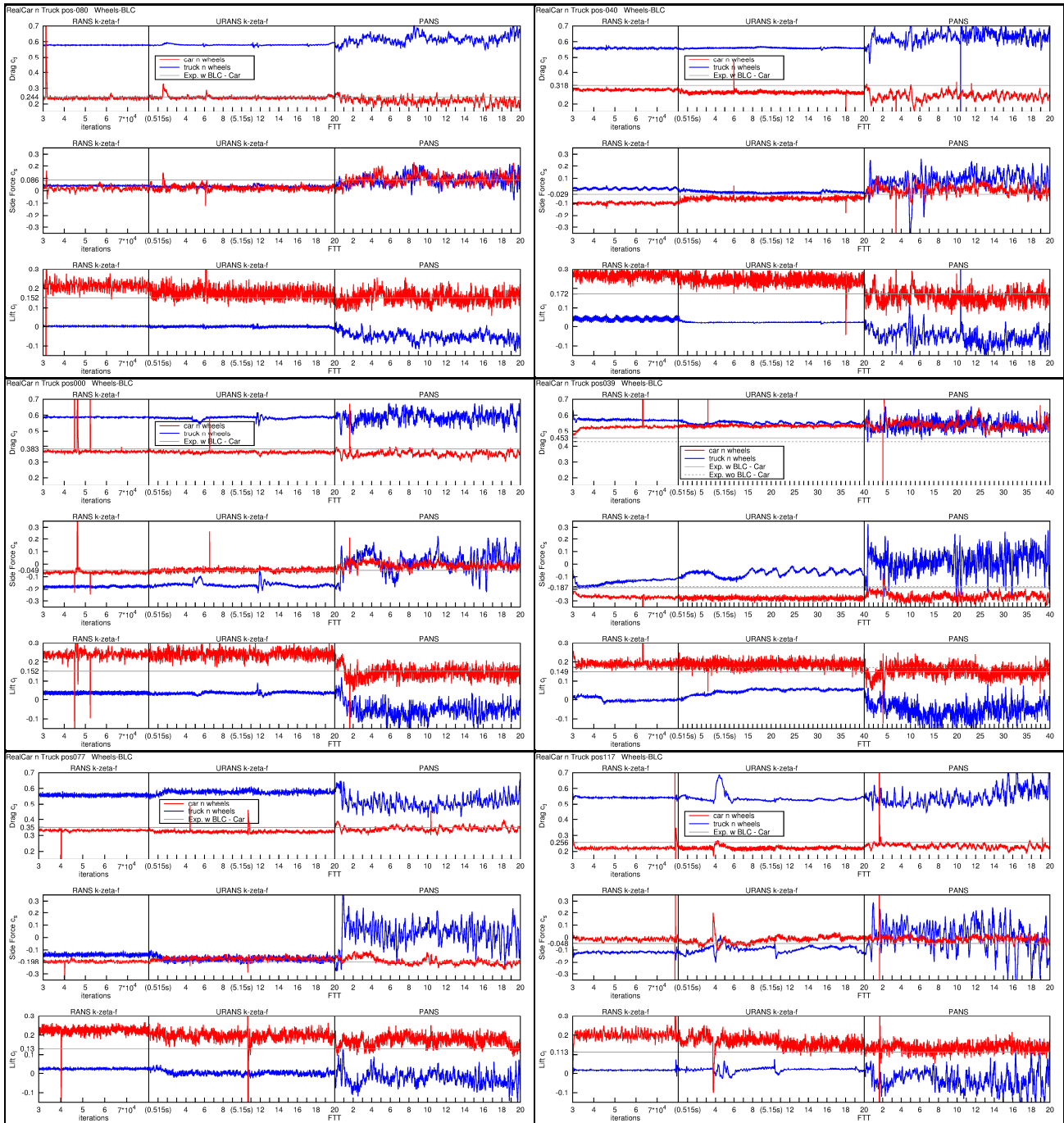
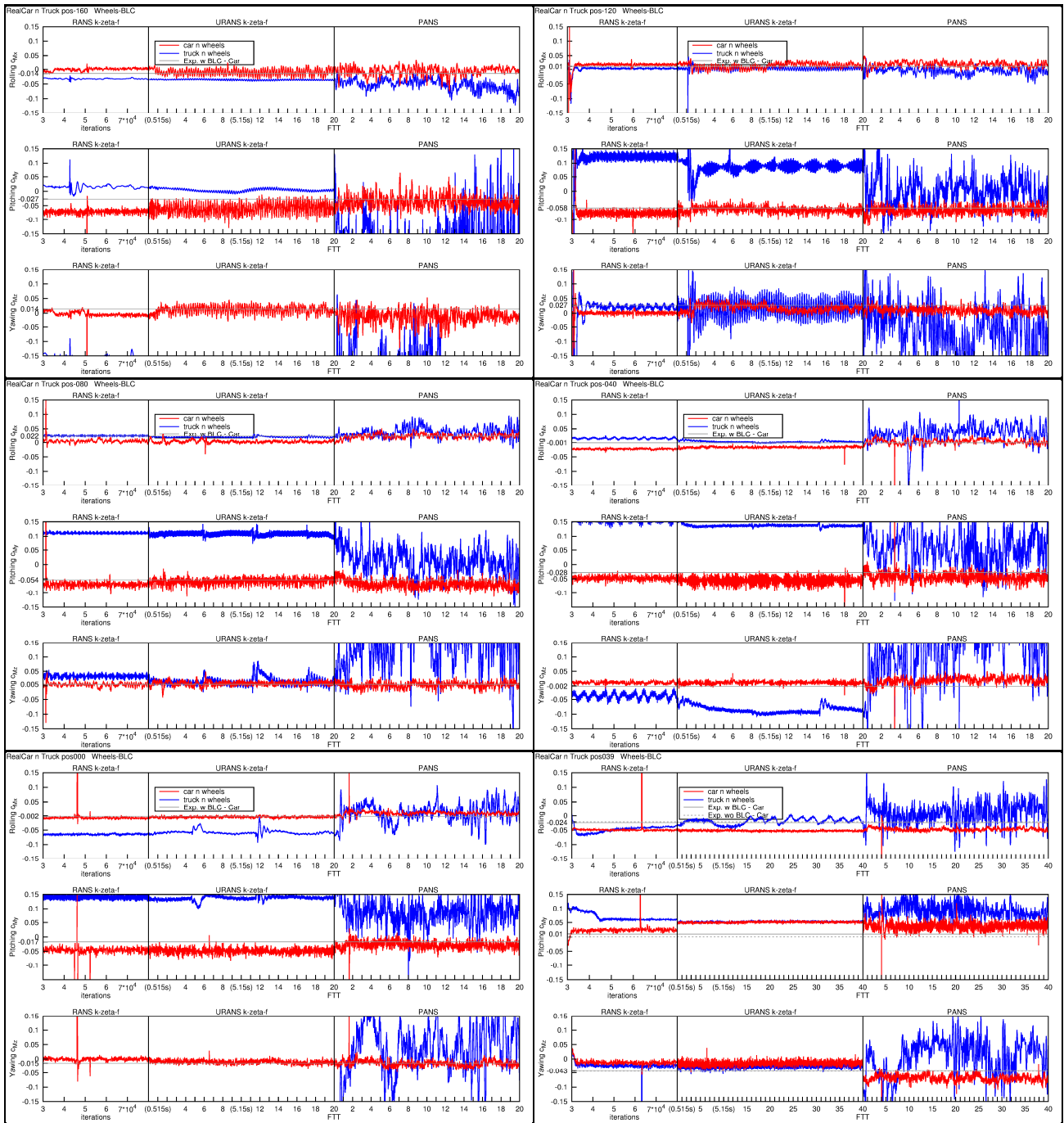


Bild 5.21: Verläufe des Luftwiderstands c_d , der Seitenkraft c_s , des Auftriebs c_l des PKWs und LKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in allen Positionen der Überholung.

Der Vergleich zwischen den Simulationsverfahren ist bei allen Positionen ähnlich. Die RANS Simulationen können die Instationaritäten der Umströmung nicht abbilden und liefern einen konstanten Verlauf der Luftwiderstände. Bei den URANS Simulationen kommt es zu periodischen Oszillationen der Luftwiderstände, was die Ablösungen der Grobstrukturen darstellt. Dank der durch PANS zum Teil aufgelösten Strömung sind die Fluktuationen und Oszillationen der Umströmung erst anhand des Luftwiderstandverlaufes sichtbar. Wenn sich das PKW-Modell bei den Positionen $x/L = -1,60$ und $x/L = -1,20$ in dem Nachlauf des LKW-Modells befindet, weist vor allem die Seitenkraft c_s und der Auftrieb c_l verstärkte Schwankungen auf. Das gleiche gilt auch für das LKW-Modell, sobald es sich in dem Nachlauf des PKW-Modells befindet, was den Positionen $x/L = 0,39$, $x/L = 0,77$ und $x/L = 1,17$ entspricht. Dort steigt die Schwankungsrate seiner Seitenkraft c_s und seines Auftriebs c_l . Wegen den langen scharfen Kanten entstehen auf dem LKW-Modell starke Ablösungen,

die die größeren Oszillationen verursachen. Das nächste Bild 5.22 zeigt den Verlauf der Momentenbeiwerte c_{M_x} , c_{M_y} und c_{M_z} für die drei Simulationsverfahren bei allen Überholpositionen.



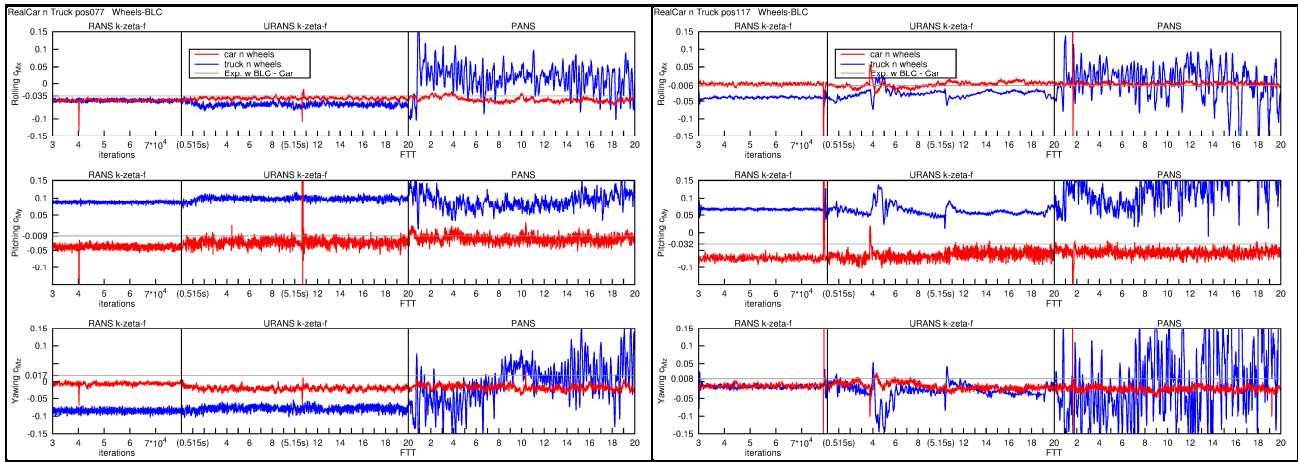


Bild 5.22: Verläufe des Rollmomentbeiwerts c_{M_x} , Nickmomentbeiwerts c_{M_y} , des Giermomentbeiwerts c_{M_z} des PKWs und LKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit *BLC* in allen Positionen der Überholung.

Bei allen Simulationen verhält sich das Rollmoment c_{M_x} genauso wie die Seitenkraft c_s . Durch den LKW-Nachlauf werden die Momentenbeiwerte des PKW-Modells nur bei der entferntesten Position $x/L = -1,60$ beeinflusst. Die straken lokalen Schwankungen und Oszillationen bei den PANS Simulationen, die bei dem LKW-Modell auftreten, werden wieder durch die kantige Oberfläche verursacht. Auf der abgerundeten PKW-Oberfläche oszillieren die Momentenbeiwerte nur wenig und erreichen kleinere Werte als die Luftwiderstandsbeiwerte. Bei diesem Vergleich wurde nur über die Schwankungs- bzw. Oszillationsrate gesprochen. Der absolute Wert der Luftwiderstandsbeiwerte c_d , c_s und c_l und der Momentenbeiwerte c_{M_x} , c_{M_y} und c_{M_z} in den einzelnen Positionen wird anhand der Bilder Bild 5.23 und Bild 5.24 beschrieben. Das Bild 5.23 zeigt die Luftwiderstandsbeiwerte c_d , c_s und c_l von dem PKW- und LKW-Modell über alle Positionen bei der RANS, URANS und PANS Simulation. Bei dem Luftwiderstand c_d und dem Auftrieb c_l ist durch die Position $x/L = 0,00$ das Feld auf den Bereich *Car behind the truck*, wo sich das PKW-Modell hinter dem LKW-Modell befindet, und *Car in front of the truck*, wo der PKW vor dem LKW steht, geteilt. Bei der Seitenkraft c_s wird das Feld durch den Nullwert geteilt. Wenn die Seitenkraft c_s positiv ist, wird das PKW-Modell zu dem LKW-Modell angesaugt; bei einer negativen Seitenkraft c_s wird das PKW-Modell von dem LKW-Modell abgestoßen. Für das LKW-Modell gilt das dann umgekehrt.

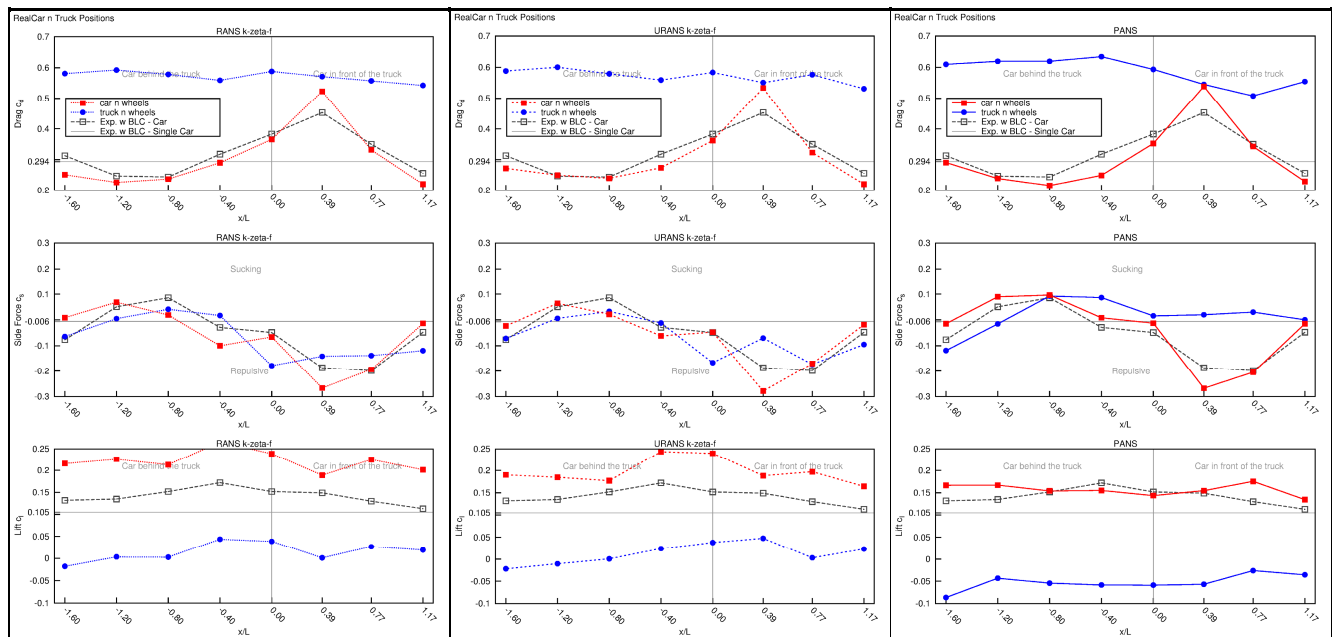


Bild 5.23: Verlauf des Luftwiderstands c_d , der Seitenkraft c_s , des Auftriebs c_l des PKWs und LKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit *BLC* über alle Positionen der Überholung.

Was den Luftwiderstand c_d des PKW-Modells angeht, entsteht hinter dem LKW-Modell ein großes Totwassergebiet, das in den Nachlauf übergeht. Solange sich das PKW-Modell in diesem Gebiet befindet, wird dadurch seine Anströmgeschwindigkeit vermindert. Je näher das PKW- dem LKW-Modell kommt, desto kleiner wird der Luftwiderstand c_d . Dieser Effekt ist bekannt als Windschattenfahren. Aus diesem Grund sollte der Luftwiderstand c_d bei der Position $x/L = -1,60$ nicht größer als der Luftwiderstand c_d des Solofahrzeugs sein, wie auch in nächstem Kapitel bewiesen wird. Diese Erhöhung des Luftwiderstandes c_d wird den Interferenzen mit dem Windkanal zugeschrieben. Die RANS Simulation scheint von den Interferenzen am wenigsten betroffen zu sein und zeigt einen Verlauf, der der Theorie am nächsten liegt. Sobald die PKW-Front das LKW-Heck überholt steigt der Luftwiderstand c_d kontinuierlich bis er sein Maximum bei der Position $x/L = 0,39$ erreicht. Dabei interferieren die beiden Staugebiete am stärksten. Wenn das PKW- das LKW-Modell komplett verlässt, sinkt der Luftwiderstand c_d wieder. Dabei befindet sich immer das PKW-Modell in dem Staugebiet des LKWs, was einen erhöhten Luftwiderstand c_d als bei einem Solofahrzeug zur Folge hat. Erst wenn das Staugebiet des LKWs auf das PKW-Modell von hinten wirkt, wird sein Luftwiderstand c_d kleiner als bei dem Solofahrzeug. Bei dem Luftwiderstandsverlauf des LKW-Modells kann man sich nicht auf experimentelle Daten stützen; deswegen wird nicht über die Simulationsergebnisse polemisiert. Am plausibelsten zeigt sich aber der Verlauf der PANS Simulation, wo der Luftwiderstand c_d sein Maximum auf der Fahrzeughalblänge, das heißt bei der Position $x/L = -0,40$ erreicht; genauso wie das bei dem PKW-Modell in der Position $x/L = 0,39$ der Fall ist.

Der Seitenkraftverlauf des PKW-Modells wird wie folgt beschrieben. Wenn sich der PKW in dem LKW-Nachlauf befindet, wird er in Richtung der schnelleren Umströmung abgestoßen. Erst wenn sich beide Fahrzeugmodelle nähern, wird das PKW-Modell in den Positionen $x/L = -1,20$ und $x/L = -0,80$ in das LKW-Totwasser angesaugt. Bei den Positionen $x/L = -0,40$ und $x/L = 0,00$ entsteht zwischen beiden Fahrzeugen eine sogenannte Kanalströmung. Der Saugeffekt verbleibt, wird aber weiterhin abgeschwächt, wobei später die Wirkung der beiden Staugebieten ganz überwiegt. In der Position $x/L = 0,39$ verursacht das LKW-Staugebiet die stärkste Abstoßwirkung, die dann in der Position $x/L = 0,77$ vermindert wird und bei der letzten Position $x/L = 1,17$ fast abklingt. Bei dem Verlauf der Seitenkraft c_s , die auf das LKW-Modell wirkt, lässt sich aus dem PKW-Verlauf der Schluss ziehen, dass das LKW-Modell in den Positionen $x/L = -0,80$ und $x/L = -0,40$ durch das PKW-Staugebiet am stärksten abgestoßen wird, was durch die PANS Simulation am besten wiedergegeben wird. Die negative Seitenkraft c_s bei der Position $x/L = -1,60$ wird wegen dem nahliegenden Düsenaustritt verursacht.

Den Auftrieb c_l genau zu treffen wie im Experiment ist eine Herausforderung für alle drei Simulationsverfahren. Der Auftrieb c_l wird generell bei der RANS und URANS Simulationen überschätzt, die beste Übereinstimmung mit dem Experiment, was die Größenordnung betrifft, liefert die PANS Simulation. Laut Experiment ist der Auftrieb c_l des PKW-Modells in den hinteren Positionen leicht erhöht und steigt kontinuierlich, bis er bei der Position $x/L = -0,40$ sein Maximum erreicht. Danach sinkt er in den vorderen Positionen wieder, bis er sich fast dem Wert eines Solofahrzeuges angleicht. Die Simulationen zeigen eine deutliche Auftriebserhöhung bei der Positionen $x/L = -1,60$ und $x/L = -1,20$ wenn sich das PKW-Modell in dem Nachlauf des LKW-Modells befindet. Bei PANS ist diese Erhöhung sogar größer als die, die durch das überholte LKW-Modell bei der Position $x/L = -0,40$ verursacht wird. In der Position $x/L = -0,40$ reagieren die Simulationsverfahren RANS und URANS zwar richtig, sie überschätzen aber den Auftriebswert deutlich. Der erhöhte Auftrieb c_l in der Position $x/L = 0,77$ wird wahrscheinlich durch das LKW-Staugebiet verursacht. Der Auftrieb c_l des LKW-Modells bei der PANS Simulation reagiert ebenso auf die Anwesenheit des PKWs bei der Position $x/L = -1,20$. Bei den Positionen $x/L = 0,77$; $x/L = 1,17$ wird er ähnlich durch den PKW-Nachlauf erhöht.

Das nächste Bild 5.24 zeigt dann den Verlauf der Momentenbeiwerte c_{Mx} , c_{My} und c_{Mz} von dem PKW- und LKW-Modell über alle Positionen bei den RANS, URANS und PANS Simulationen.

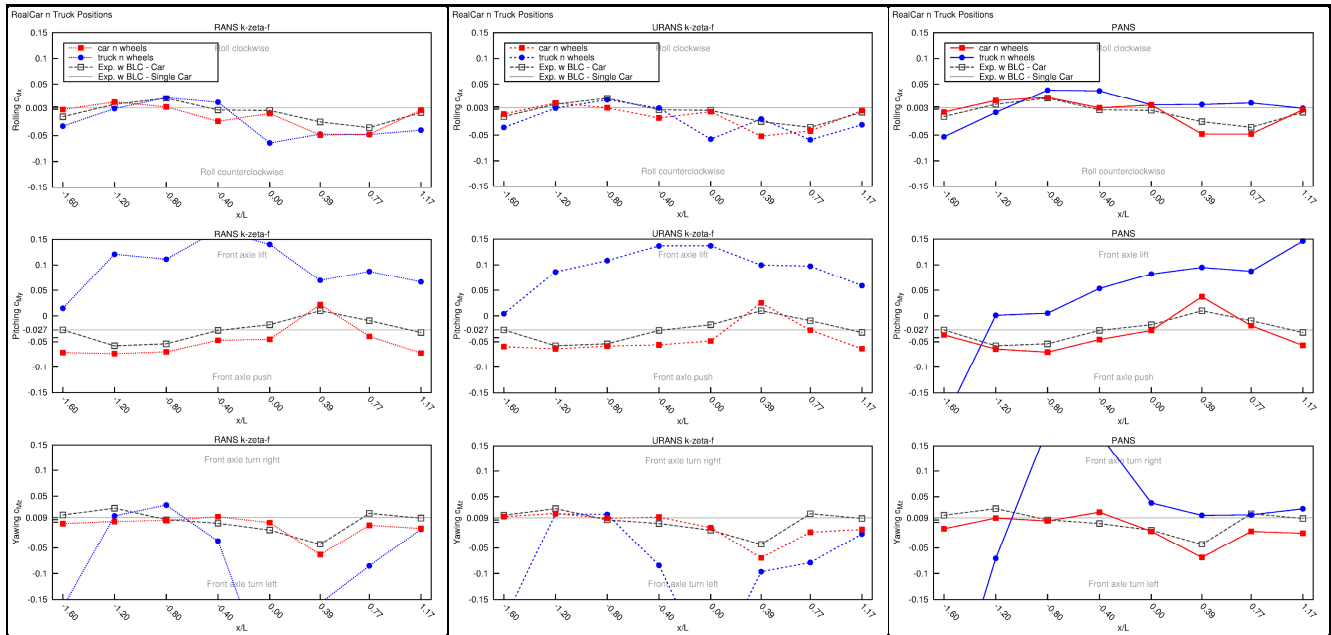


Bild 5.24: Verlauf des Rollmomentbeiwerts c_{M_x} , Nickmomentbeiwerts c_{M_y} , des Giermomentbeiwerts c_{M_z} des PKWs und LKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC über alle Positionen der Überholung.

Der Verlauf des Rollmoments c_{M_x} verhält sich wieder genauso wie der Seitenkraftverlauf. Wegen seinen kleineren Werten fallen bei den Simulationen die Abweichungen vom Experiment nicht so auf. Das Rollmoment c_{M_x} des PKW-Modells ändert sein Vorzeichen genauso wie die Seitenkraft c_s und wirkt in gleicher Weise. In der hinteren Position $x/L = -1,60$ wird er ebenso durch den LKW-Nachlauf beeinflusst, das PKW-Modell rollt gegen den Uhrzeigersinn weg vom LKW. In den weiteren zwei Positionen $x/L = -1,20$; $x/L = -0,80$ wird der PKW zum LKW angesaugt, der PKW rollt im Uhrzeigersinn. Während die Fahrzeuge aneinander liegen, wird er nur wenig gestört. Erst durch die Wirkung des LKW-Staugebietes wird er in den Positionen $x/L = 0,39$; $x/L = 0,77$ erhöht, das PKW-Modell rollt gegen den Uhrzeigersinn. Das negative Rollmoment c_{M_x} des LKW-Modells bei der Position $x/L = -1,60$ lässt sich auf die Interferenz mit dem Windkanal zurückzuführen. Während der Überholung wird der LKW durch das PKW-Staugebiet von dem PKW abgestoßen und rollt im Uhrzeigersinn.

Die Reduzierung des Nickmoments c_{M_y} im Vergleich zu dem Wert des Solofahrzeugs nicht mit dem PKW-Modell so, dass dadurch die Vorderachse belastet und die Hinterachse entlastet wird. Dieser Effekt entsteht hinter dem LKW bei den Positionen $x/L = -1,20$ und $x/L = -0,80$. Eine deutliche Entlastung der Vorder- und Belastung der Hinterachse entsteht wieder durch das LKW-Staugebiet in der Position $x/L = 0,39$. Eine Entlastung der Vorderachse kann sich negativ auf die Fahrstabilität auswirken. Bei dem LKW-Modell ist durch das Nickmoment c_{M_y} die Vorderachse während dem ganzen Überholvorgang entlastet, was auch an der Unterbodengeometrie liegt.

Eine weitere wichtige Störung der Richtungsstabilität stellt neben der Seitenkraft c_s das Giermoment c_{M_z} dar. Vom Fahrer wird mehr ein Gieren als ein Parallelversatz wahrgenommen. In der hintersten Position $x/L = -1,60$ ist das Giermoment c_{M_z} des PKW-Modells bei den Simulationen durch den LKW-Nachlauf stärker ausgeprägt als bei dem Experiment. Die Vorderachse des PKWs wird von dem LKW abgestoßen. Beim Ansaugen in der Position $x/L = -1,20$ giert der PKW mit seiner Vorderachse zum LKW. Während der weiteren Überholung wird die PKW-Vorderachse von dem LKW abgestoßen, wobei das negative Giermoment c_{M_z} sein Maximum dann erreicht, wenn die vordere Fahrzeughälfte das LKW-Staugebiet bei der Position $x/L = 0,39$ trifft. Bei der nächsten Position $x/L = 0,77$ trifft das LKW-Staugebiet die PKW-Hinterachse und das Giermoment c_{M_z} ändert bei dem Experiment sein Vorzeichen. Die unterschiedlichen Ergebnisse bei dem Giermoment c_{M_z} des LKW-Modells sind auf die kantige Geometrie und auf die großen Flächen des LKWs und auf die nicht ausreichende Simulationsdauer zurückzuführen. Nach der PANS Simulation wirkt das PKW-Staugebiet auf die LKW-Hinterachse und später auf die LKW-Vorderachse abstoßend. Während der

Überholung ändert das Giermoment c_{M_z} sein Vorzeichen. Seine großen Amplituden sind mit den großen Flächen des Laderaums und der Fahrerkabine verbunden.

Als nächstes werden nur die Luftwiderstände und Momente des PKW-Modells aus der Messung und den Simulationen bei den einzelnen Überholpositionen miteinander verglichen. Die Verläufe auf dem Bild 5.25 werden dazu um den Auftrieb auf der Vorderachse c_l (*front*) und auf der Hinterachse c_l (*rear*) erweitert.

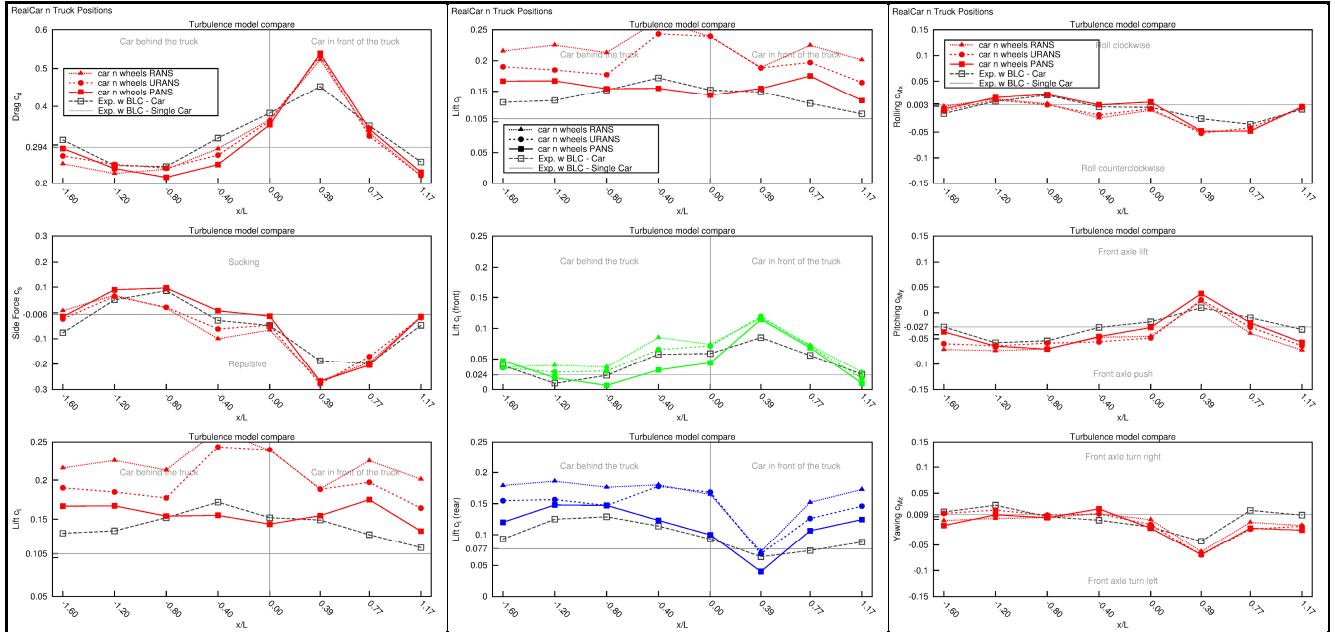


Bild 5.25: Verlauf des Luftwiderstands c_d , der Seitenkraft c_s , des Auftriebs c_l (auf der Vorder- und Hinterachse), des Roll- c_{M_x} , Nick- c_{M_y} und des Giermomentbeiwerts c_{M_z} des PKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC über alle Positionen der Überholung.

Bei der Position $x/L = -1,60$ entstehen Interferenzen mit dem Windkanal, während das LKW-Modell zu nahe dem Düsenaustritt steht. Diese Auswirkung auf die Luftwiderstände und Momente kann die PANS Simulation generell am besten abbilden. Der Luftwiderstand c_d und die Seitenkraft c_s zeigen bei der nächsten Position $x/L = -1,20$ eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment. Bei beiden Positionen ist das PKW-Modell stärker von dem LKW-Nachlauf getroffen als beim Experiment. Der Auftrieb c_l ist bei allen Simulationen dadurch erhöht und bei RANS und URANS zusätzlich überschätzt. Die Position $x/L = -0,80$ mit dem stärksten Ansaugungseffekt wird, was die Seitenkraft c_s und den Auftrieb c_l betrifft, durch die PANS Simulation am besten getroffen. Bei PANS wird der Luftwiderstand c_d während der Phase mit einer positiven Seitenkraft c_s am meisten unterschätzt. Der Überholmoment, bei dem die beiden Fahrzeuge zum Teil oder ganz nebeneinander stehen, das heißt Positionen $x/L = -0,40$ und $x/L = 0,00$, zeichnet sich durch eine große Überschätzung des Auftriebes c_l bei RANS und URANS aus. Bei PANS muss gelobt werden, dass die Tendenz der Seitenkraft c_s beim Experiment gut getroffen wird. Bei der Position $x/L = 0,39$ interagieren die Staugebiete der beiden Fahrzeuge in den Simulationen stärker als beim Experiment. Daraus entsteht ein großer Luftwiderstand c_d und eine zu große Abstoßung bei der Seitenkraft c_s . Der Auftrieb c_l ist an dieser Stelle durch die PANS Simulation gut abgebildet. Bei den letzten Positionen $x/L = 0,77$ und $x/L = 1,17$ herrscht bei dem Luftwiderstand c_d und der Seitenkraft c_s eine gute Übereinstimmung. Die Erhöhung des Auftriebes c_l bei beiden Positionen wird durch das LKW-Staugebiet verursacht, das die Strömung unter dem PKW-Modell bremst.

Untersucht man nun den Auftrieb auf der Vorderachse c_l (*front*) und auf der Hinterachse c_l (*rear*) ist es deutlich, dass es zu den größten Abweichungen bei den Simulationsverfahren auf der Hinterachse kommt. Die PANS Simulation zeigt wieder Verläufe mit der besten Übereinstimmung. Bei der Überholung wird die Vorderachse kontinuierlich entlastet, bis der Auftrieb c_l (*front*) bei der Position $x/L = 0,39$ sein Maximum erreicht. Die Hinterachse wird dagegen nach einem früheren Anstieg schrittweise belastet, während das Minimum des Auftriebes c_l (*rear*) ebenso in der Position $x/L = 0,39$ stattfindet.

Die Verläufe der Momentenbeiwerte c_{Mx} , c_{My} und c_{Mz} liefern bei den Simulationen eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment. Zwischen den Simulationsverfahren ist PANS wieder das genaueste. Hier ist es wichtig, dass bei PANS in den meisten Fällen die Orientation des Moments mit dem Experiment übereinstimmt. Der Maximalwert bei allen Momenten findet wieder in der Position $x/L = 0,39$ statt. Das Fahrzeug rollt bei der Überholung zuerst im Uhrzeigersinn, nickt nach vorne und giert leicht im Uhrzeigersinn. Danach ändert sich die Rollrichtung: Das Fahrzeug nickt auch umgekehrt nach hinten und das Giermoment wechselt ebenfalls sein Vorzeichen.

Der Druckwiderstandsbeiwert c_p zeigt bei den Überholpositionen auf der Fahrzeugoberfläche deutlich geringe Veränderungen im Vergleich zu dem Maßstab bei seinem Verlauf. Damit die Druckveränderungen trotzdem sichtbar sein können, wurde die Druckveränderung bei dem Überholvorgang auf das Solofahrzeug bezogen. Auf den Bildern Bild 5.26, Bild 5.27, Bild 5.28, Bild 5.29 und Bild 5.30 stellt die graue Linie die experimentellen Ergebnisse von dem Solofahrzeug dar. Daneben zeigen die farbigen Linien die Simulationsergebnisse aus der Simulation *RealCar_Calculation4* von Cases *Wheels-BLC-RANS*, *Wheels-BLC-URANS* und *Wheels-BLC-PANS*. Durch die Flächen unterschiedlicher Helligkeit werden die Druckunterschiede dargestellt. Vor den farbigen Flächen der Simulationsergebnisse ist eine hellgraue Fläche, die der experimentellen Druckveränderung entspricht, zum Vergleich positioniert. Die Skala bezieht sich auf den Druckverlauf; die Druckveränderung ist nur qualitativ dargestellt.

Auf dem Bild 5.26 sind die Werte in den Messpunkten auf den zwei symmetrischen Ebenen $y = -0,16m$ und $y = 0,16m$ auf der Fahrzeugoberseite aufgezeigt. Bei der hintersten Position $x/L = -1,60$ werden nur kleine Unterdrücke im Vergleich zu dem Solofahrzeug experimentell beobachtet. Die Simulationen überschätzen den Unterdruck, wobei das PANS Verfahren die kleinste Abweichung vom Experiment zeigt. Die Strömung bei dieser Überholposition wird auf der Oberseite leicht beschleunigt. Durch die Annäherung an das LKW-Modell bei der Position $x/L = -1,20$ entsteht in dem vorderen Teil ein größerer Unterdruck. Das stimmt mit dem Tiefdruckgebiet des LKW-Totwassers, wo sich die vordere PKW-Hälfte befindet, überein. Der erhöhte Unterdruck in dem vorderen Teil wird von den Simulationen gut getroffen. In dem hinteren Teil der Fahrzeugoberseite wird der Unterdruck wie bei der vorherigen Position bei den Simulationen überschätzt. Eine ähnliche Situation zeigt die Position $x/L = -0,80$. Der Unterdruck wird entlang der ganzen Oberseite weiter erhöht. Bei dieser Position zeigen sich die ersten Asymmetrien zwischen der rechten und der linken Seite. Sie wird dann bei der nächsten Position $x/L = -0,40$ noch stärker. Das PKW-Modell steht komplett neben dem LKW-Modell; dadurch wird die Kanalströmung zwischen beiden Fahrzeugmodellen mehr beschleunigt als in der Umströmung. Der Unterdruck wird also an der rechten Seite größer als an der linken Seite. Die PANS Simulation zeigt hier sehr gute Übereinstimmung mit dem Experiment. Die RANS und URANS Simulationen liefern wieder leicht überschätzte Werte. Bei der Position $x/L = 0,00$ entsteht die größte Abweichung der Simulationen von dem Experiment. Die Strömung auf dem Dach wird schneller dargestellt und dadurch wird der Druck niedriger. In dem vorderen Teil zeigt sich durch einen kleineren Unterdruck schon die Wirkung des LKW-Staugebietes. Bei der nächsten Position $x/L = 0,39$ steht die vordere Fahrzeughälfte vor dem LKW-Modell und somit ist sie dem LKW-Staugebiet komplett ausgesetzt. Dadurch entsteht auf der Oberseite ein Überdruck, während im deren hinteren Teil noch immer der Unterdruck herrscht. Der wird wie bei der vorherigen Position von den Simulationen wieder überschätzt. Die Druckverteilung auf der Oberseite hat wieder einen asymmetrischen Charakter. Auf der rechten Seite entsteht eine größere Druckveränderung im Vergleich zu der linken Seite. Je mehr sich das PKW- vor dem LKW-Modell befindet, desto mehr wirkt sich das LKW-Staugebiet durch einen Überdruck auf der Oberseite aus. Bei der Position $x/L = 0,77$ herrscht auf dem Dach der größte Überdruck. Im Heckbereich setzt sich noch ein Unterdruck durch, der die Strömungsbeschleunigung zwischen den beiden Fahrzeugmodellen darstellt. Bei der letzten Position $x/L = 1,17$ befindet sich die Fahrzeugoberseite komplett in einem Überdruckgebiet, wobei die Wirkung des LKW-Staugebietes in dem Frontbereich wieder langsam abklingt.

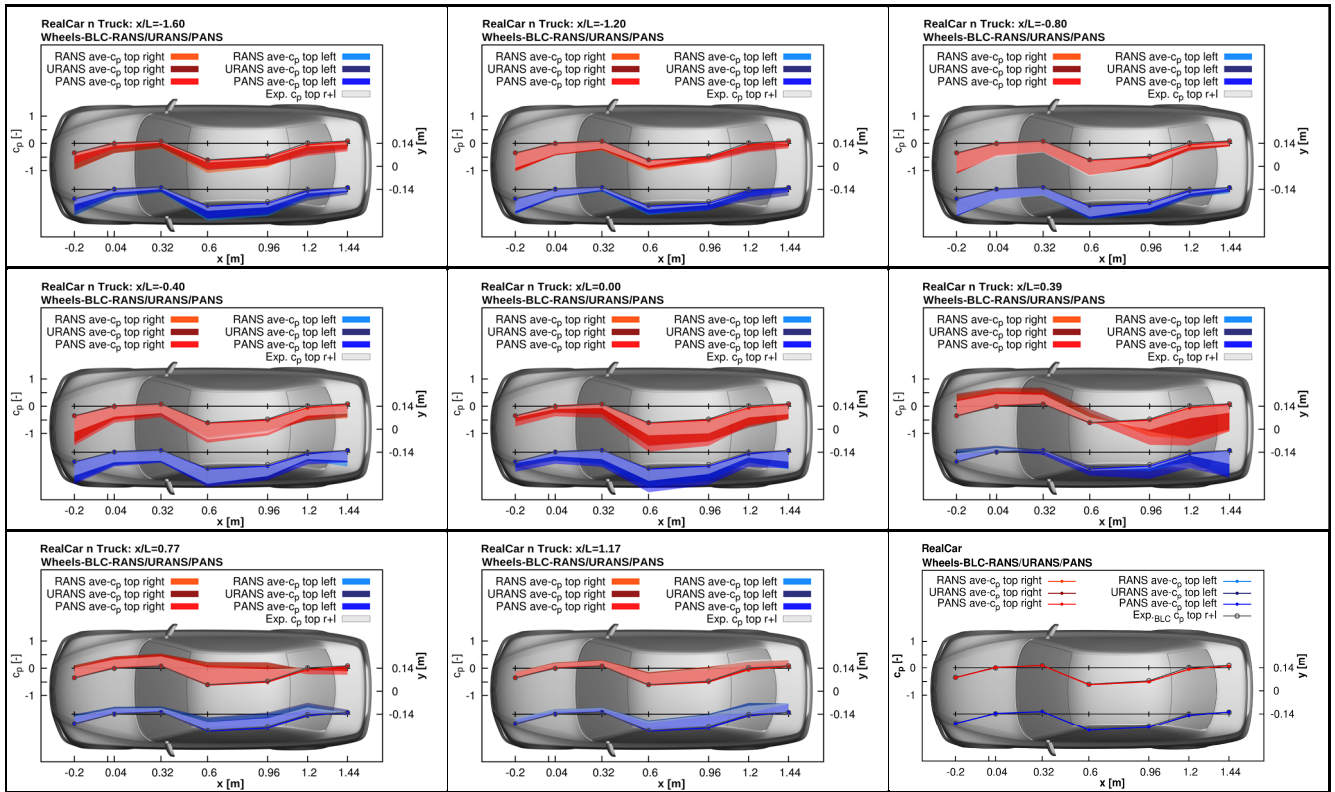


Bild 5.26: Die Druckveränderung bei der Überholung auf der Oberseite des PKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC im Vergleich zum Solofahrzeug in allen Positionen.

Auf dem nächsten Bild 5.27 wird der Druckunterschied in den Messpunkten auf dem Unterboden in einer Zentralebene $y = 0m$ dargestellt. Man fängt wieder mit der Position $x/L = -1,60$ an. Das Experiment zeigt eine Senkung des Druckes entlang des ganzen Unterbodens im Vergleich zu dem Solofahrzeug, die durch den Überholvorgang verursacht wurde. Diese Veränderung der Druckverhältnisse wird durch die Simulationen in allen Messpunkten gut wiedergegeben. Die beste Übereinstimmung bringt wieder die PANS Simulation. Die RANS und URANS Simulationen überschätzen mehr die Größe des Unterdruckes. Bei der nächsten Position $x/L = -1,20$ ändert sich die Druckdifferenz. In dem vorderen Teil herrscht nach wie vor ein Unterdruck, der sich in dem Heckbereich in Überdruck umwandelt. Der Überdruck auf der Reserveradmulde können die Simulationsverfahren nicht befriedigend abbilden. Ein ähnliches Verhalten bietet die Position $x/L = -0,80$ an. Das PKW-Modell trifft wieder an das LKW-Modell, wodurch die Strömung beschleunigt wird und der Druck weiter sinkt. Die Simulationen zeigen einen deutlichen Unterdruck in allen Messpunkten. Dadurch entsteht auf der Reserveradmulde wieder eine Abweichung, wo das Experiment einen leichten Überdruck aufweist. Wenn das PKW-Modell komplett neben dem LKW-Modell steht, was die Position $x/L = -0,40$ darstellt, entsteht auf dem Unterboden in allen Messpunkten ein markanter Unterdruck. In dem Heckbereich wird er durch die RANS Simulation deutlich überschätzt. Genauso wie die größten Abweichungen der Simulationen auf der Fahrzeugoberseite, entstehen bei der Position $x/L = 0,00$ auch die größten Abweichungen bei allen drei Simulationen. Im Vergleich zum Experiment wird der Unterdruck an der zweiten Fahrzeughälfte deutlich überschätzt. Des Weiteren wird, ähnlich wie auf der Oberseite, die Auswirkung des LKW-Staugebietes im Frontbereich bei den Simulationen nicht deutlich. Auf dem Frontdiffusor, wo laut Experiment schon ein leichter Überdruck herrscht, wird durch die Simulationen immer noch ein Unterdruck gezeigt. Bei der nächsten Position $x/L = 0,39$ trifft das LKW-Staugebiet auf die vordere Fahrzeughälfte und verursacht dort so einen Überdruck. In der zweiten Fahrzeughälfte herrscht immer noch ein Unterdruck, der auf der Reserveradmulde durch die Simulationen wieder überschätzt wird. Bei den vorderen Positionen $x/L = 0,77$ und $x/L = 1,17$, wo sich das PKW-Modell komplett vor dem LKW-Modell befindet, entsteht in den Messpunkten auf dem Unterboden ein Überdruck, der durch das LKW-Staugebiet verursacht wird. Die Simulationsergebnisse stimmen mit den experimentellen Daten gut überein. Ähnlich wie auf der Oberseite klingt der Überdruck mit zunehmender Entfernung kontinuierlich ab.

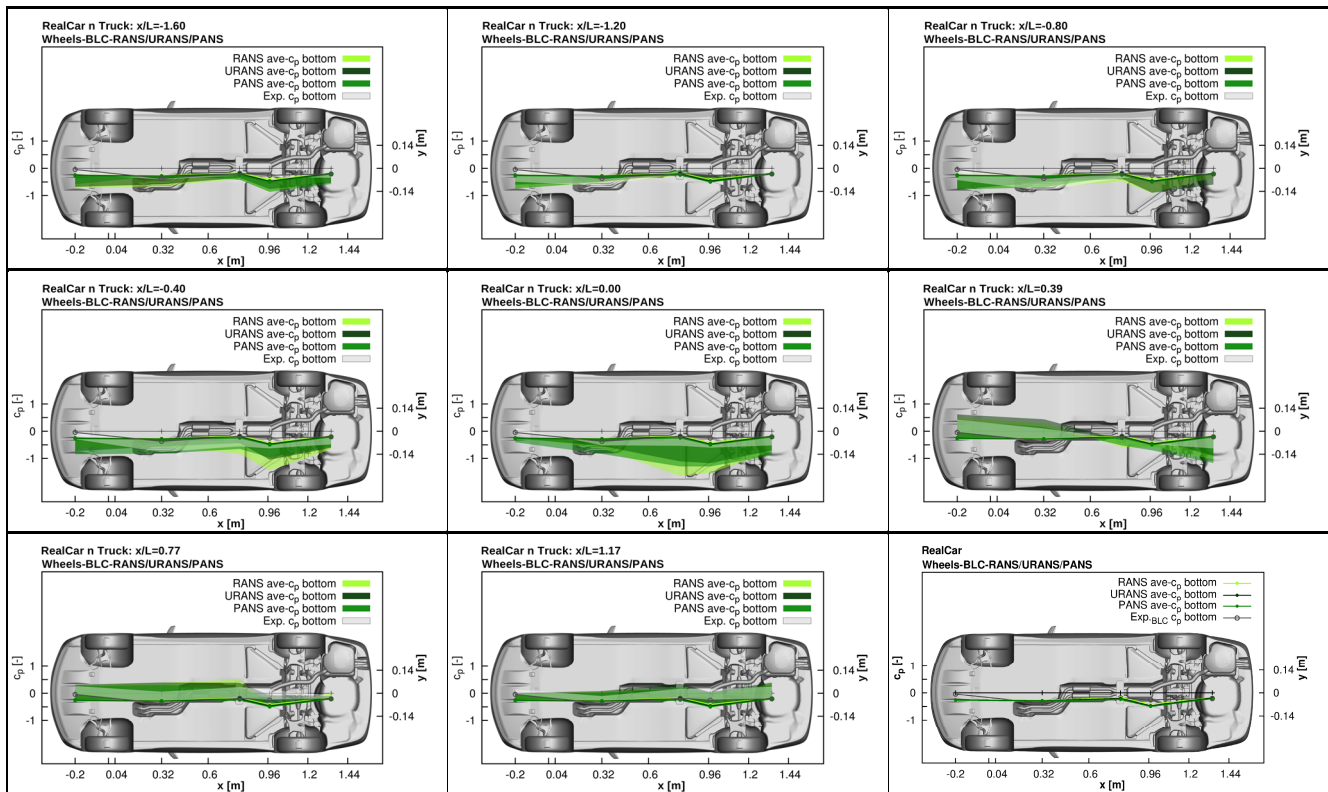


Bild 5.27: Die Druckveränderung bei der Überholung auf der Unterseite des PKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC im Vergleich zum Solofahrzeug in allen Positionen.

Als Nächstes wird auf dem Bild 5.28 die Druckdifferenz in dem Messpunkt auf dem Bug in der Zentralebene $y = 0m$ in einer Höhe von $z = 0,04m$ und in den zwei Messpunkten im Heck mit den Koordinaten $y = -0,16m$, $y = 0,16m$ und $z = 0,16m$ gezeigt. Bei Darstellung der Druckdifferenz in separierten Punkten zeigt der graue Kreis das Messergebnis und die farbigen Punkte zeigen die Simulationsergebnisse des Solofahrzeugs. Die Druckdifferenzen werden als vertikale Linien dargestellt. Beim Experiment wurde angenommen, dass der Druckwiderstandsbeiwert c_p in dem Messpunkt auf dem Bug bei jeder Position den Wert von $c_p = 1$ aufweist. Bei näherer Untersuchung der Simulationsergebnisse stellt sich heraus, dass der Druckwiderstandsbeiwert c_p bei manchen Positionen vom Wert $c_p = 1$ abweicht. Diese Vereinfachung negativ beeinflusst den Wert der Grenze zwischen Unter- und Überdruck. Im Heck entsteht bei der Position $x/L = -1,60$ im Totwasser ein größerer Unterdruck auf der rechten als auf der linken Seite. In diesem Fall zeigt die RANS Simulation eine bessere Übereinstimmung mit dem Experiment als PANS. Es bleibt aber nur bei einem Einzelfall. Bei der nächsten Position $x/L = -1,20$, bei der das PKW-Modell in Richtung des LKW-Modells angesaugt wird, entsteht ein noch größerer Unterdruck auf der rechten Seite und auf der linken Seite wandelt sich der Unterdruck in Überdruck um. Der Überdruck auf der linken Seite kann nur durch die PANS Simulation wiedergegeben werden. Laut Experiment herrscht auch bei der Position $x/L = -0,80$ die gleiche Druckdifferenz. Der kleinere Unterdruck auf der rechten Seite im Vergleich zu vorheriger Position wird gut durch die Simulationen abgebildet. Im Gegensatz dazu zeigen sie auf der linken Seite umgekehrt zum Experiment einen Unterdruck. Den kleinsten Unterdruck hat, und so näher am Experiment ist, die PANS Simulation. Bei der Position $x/L = -0,40$, bei der wieder beide Fahrzeugmodelle nebeneinander stehen, herrscht im Totwasser ein Unterdruck auf beiden Seiten. Nun wird der Unterdruck an der linken Seite größer als auf der rechten Seite: Die Strömungsrichtung im Totwasser ändert sich. Diese Verteilung der Druckdifferenz bleibt auch bei den Positionen $x/L = 0,00$ und $x/L = 0,39$ bestehen; dabei verstärkt sich der Unterdruck kontinuierlich. Die Simulationen zeigen auf der rechten Seite eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment. Der Unterdruck auf der linken Seite wird vor allem bei der Position $x/L = 0,39$ deutlich überschätzt. Daraus resultiert auch der erhöhte Luftwiderstand c_d bei dieser Position im Vergleich zum Experiment. Durch die Wirkung des LKW-Staugebietes auf das PKW-Modell bei der Position $x/L = 0,77$ verkleinern sich die Unterdrücke an beiden Seiten des Totwassers wieder und werden auch von den Simulationen wieder gut getroffen. Dadurch, dass sich das LKW-Staugebiet bei der letzten Position $x/L = 1,17$ hinter dem PKW-

Modell befindet, wirkt sich der Überdruckbereich vor allem im Fahrzeugheck aus: Die Druckdifferenz wandelt sich von Unterdruck in Überdruck um. Die linke Seite weist einen größeren Überdruck als die rechte Seite auf.

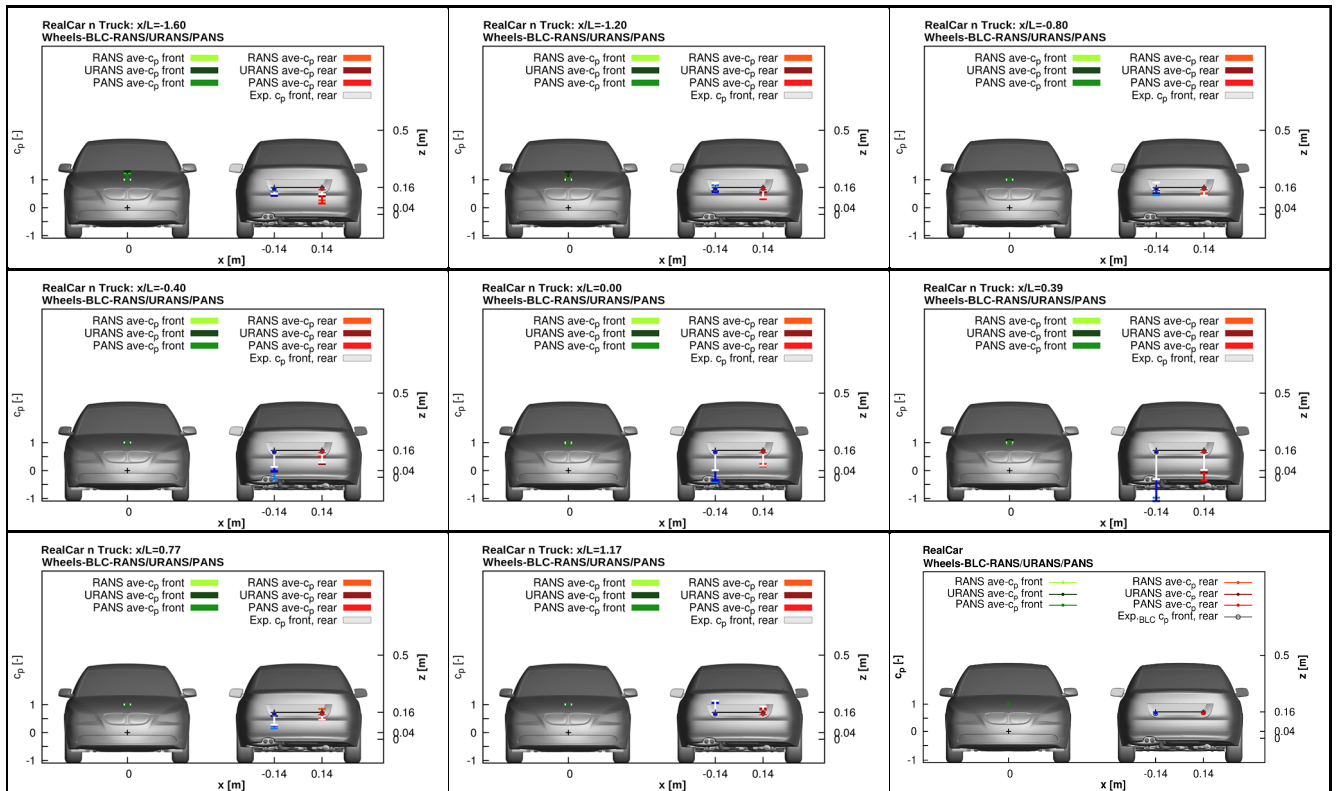


Bild 5.28: Die Druckveränderung bei der Überholung am Bug und am Heck des PKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit *BLC* im Vergleich zum Solofahrzeug in allen Positionen.

Auf der rechten und linken Fahrzeugseite sind die Messpunkte auf den vier horizontalen Ebenen $z = 0,04m$, $z = 0,16m$, $z = 0,2m$ und $z = 0,32m$ verteilt. Das Bild 5.29 zeigt den Druckunterschied auf der rechten Seite zwischen dem Solofahrzeug und der Überholung für jede Position. Bei der ersten Überholposition $x/L = -1,60$ wurde experimentell ein leichter Unterdruck beobachtet. Wie schon die vorherigen Bilder gezeigt haben, wird durch die Simulationen der Unterdruck bei dieser Position überschätzt. Die größten Abweichungen entstehen bei den Abrundungen, wo die Strömung beschleunigt wird, vor und nach dem Vorderrad und am Heck. Die geringste Abweichung vom Experiment liefert wieder die PANS Simulation. Bei Annäherung der beiden Fahrzeugmodelle in der Position $x/L = -1,20$ trifft das PKW-Modell auf das LKW-Totwasser, das einen Saugeffekt verursacht. Dadurch bildet sich ein Unterdruckgebiet in der ersten Fahrzeughälfte. Dagegen bildet sich auf der C-Säule und über dem Hinterrad ein Überdruck, der durch die PANS Simulation gut getroffen wird. Im Heckbereich wird der Unterdruck von den Simulationen wieder deutlich überschätzt. Bei der nächsten Position $x/L = -0,80$ breitet sich auch dank der Kanalströmung, die zwischen den Fahrzeugen entsteht, das Unterdruckgebiet weiter aus und trifft die ganze rechte Seite. Hier kommt es zu einer guten Übereinstimmung der PANS Simulation mit dem Experiment. Durch die RANS und URANS Simulationen wird der Unterdruck leicht überschätzt. Bei der Position $x/L = -0,40$, an der beide Fahrzeugmodelle schon nebeneinander stehen, verschiebt sich das Unterdruckgebiet nach hinten. Nach dem Experiment kommt es in dem vorderen Bereich zu einem Druckanstieg; der Unterdruck reduziert sich. Dieser Druckanstieg kann durch die Simulationen nicht wiedergegeben werden; sie zeigen an dieser Stelle immer noch starke Unterdrücke. Auf der hinteren Seitenwand wird die Unterdruckreduzierung durch die PANS Simulation am besten gefasst. Bei der weiteren Position $x/L = 0,00$ setzt sich langsam die Wirkung des LKW-Staupunktes auf das PKW-Modell durch. Wenn in der zweiten Fahrzeughälfte starke Unterdrücke herrschen, wandelt sich der Unterdruck in dem vorderen Bereich in einen Überdruck um. Diese Änderung der Druckverhältnisse wird durch die Simulationen gut abgebildet. Nur bei der A-Säule zeigen die Simulationen noch einen großen Unterdruck. Die geringste Abweichung vom Experiment bringt wieder die PANS Simulation. Der Überdruck aus dem LKW-Staugebiet ist in der Position $x/L = 0,39$ bei dem PKW-Modell am stärksten ausgeprägt. In der ersten Fahrzeughälfte entstehen dadurch große Überdrücke. Dort, wo das LKW-Modell neben dem PKW-Modell steht, überschlägt sich der Überdruck

auf einen Unterdruck, der dann weiter steigt. Diese Position zeichnet sich durch die größte Druckdifferenz im Vergleich zum Solofahrzeug aus. Sowohl der Überdruck als auch Unterdruck wird durch die Simulationen an den meisten Messpunkten deutlich überschätzt. Die kleinste Abweichung zeigt ebenso die PANS Simulation. Bei der Position $x/L = 0,77$ wird die rechte Fahrzeugseite komplett dem LKW-Staugebiet ausgesetzt. Deswegen herrschen fast überall auf der Fahrzeugseite deutliche Überdrücke, die durch die Simulationen sehr gut abgebildet werden. In dem Heckbereich will die Umströmung dem LKW-Staugebiet ausweichen und wird dadurch deutlich beschleunigt; der Druck nimmt dort stark ab. Dieses Phänomen zeigt sich bei der Simulationen wesentlich stärker und der somit entstehende Unterdruck wird im Vergleich zum Experiment erheblich überschätzt. Die Wirkung des LKW-Staugebietes durch die Druckerhöhung auf dem PKW-Modell schwächt sich an der Seite bei der Position $x/L = 1,17$ kontinuierlich ab. Es herrscht wieder eine gute Übereinstimmung zwischen den Simulationen und dem Experiment. In dem Heckbereich wird der Überdruck durch die Ausweichung der Umströmung abgesenkt. Die Rate der Absenkung wird bei den Simulationen wieder deutlich überschätzt.

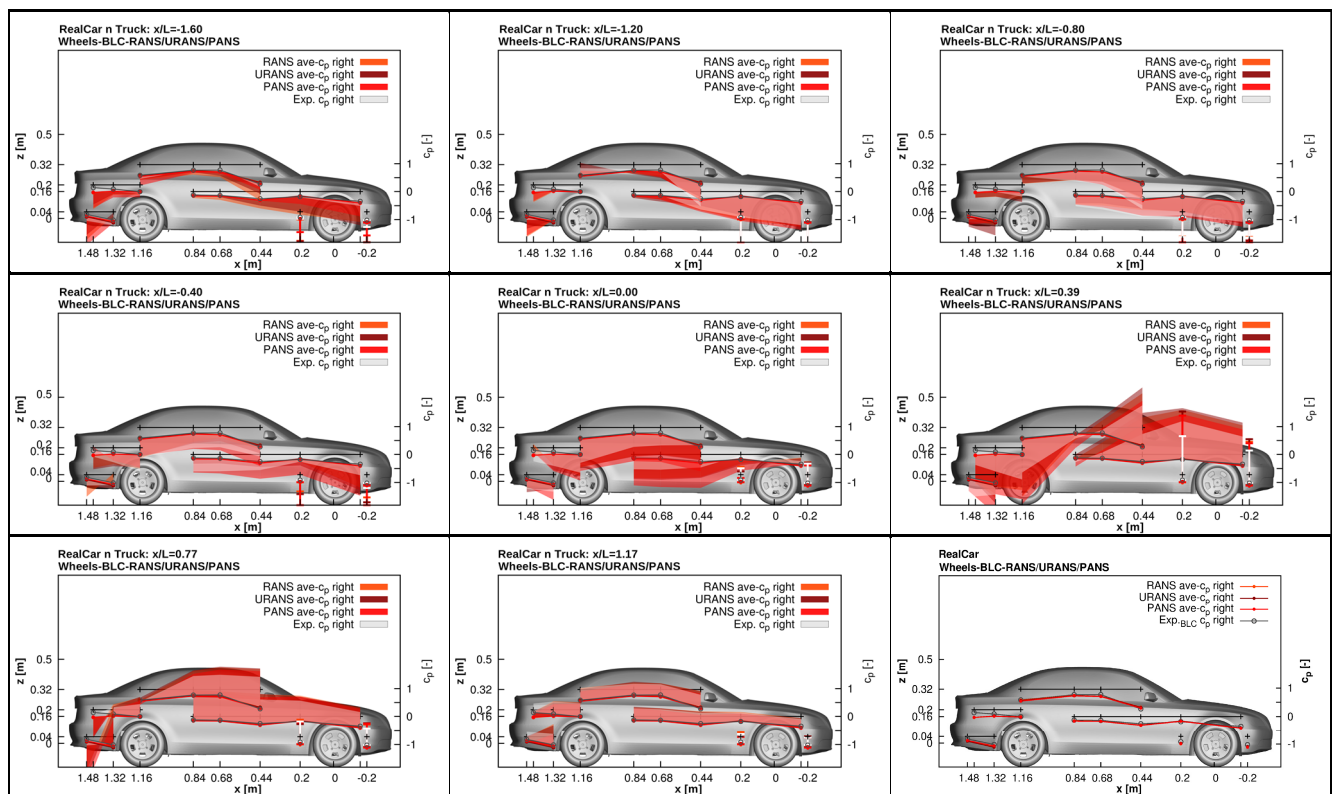


Bild 5.29: Die Druckveränderung bei der Überholung auf der rechten Seite des PKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC im Vergleich zum Solofahrzeug in allen Positionen.

Die Druckdifferenzen bei dem Überholvorgang zu dem Solofahrzeug an der linken Fahrzeugseite zeigt das Bild 5.30. Die linke Seite ist die vom LKW abgewandte Fahrzeugseite des PKWs. An der Positionen, an der das PKW-Modell hinter dem LKW-Staugebiet steht, herrschen auf der linken Seite überwiegend Unterdrücke. Die Position $x/L = -1,60$ weist vermutlich deswegen stärkere Unterdrücke als die Position $x/L = -1,20$ auf, weil das LKW-Modell zu nah dem Düsen Eintritt steht und somit den Querschnitt versperrt. Die Strömung muss ausweichen und bei gleichem Volumenstrom trifft sie das PKW-Modell mit höherer Geschwindigkeit. Im Heckbereich entsteht bei der Positionen $x/L = -1,20$ und $x/L = -0,80$ im Gegensatz dazu ein Überdruck, der sich aber wieder bei der nächsten Position $x/L = -0,40$ in einen starken Unterdruck umwandelt. Der Überdruck kann nur durch PANS zum Teil wiedergegeben werden. Die RANS und URANS Simulationen zeigen an dieser Stelle meistens einen Unterdruck. Die Positionen $x/L = -0,40$ und $x/L = 0,00$, an denen das PKW-Modell komplett neben dem LKW-Modell steht, sind durch einen starken Unterdruck entlang der ganzen Seite geprägt. Die Simulationsergebnisse treffen die experimentellen Werte mit guter Genauigkeit; jedoch liefert die PANS Simulation die kleinsten Abweichungen. Bei der nächsten Position $x/L = 0,39$ reduziert sich der Unterdruck in dem vorderen und oberen Bereich. In dem Punkt bei dem Frontscheinwerfer entsteht sogar ein leichter Überdruck, der durch die Simulationen gut wiedergegeben wird. Im Heckbereich herrscht immer

noch ein starker Unterdruck. Bei den letzten zwei Positionen $x/L = 0,77$ und $x/L = 1,17$ ist auch die linke Seite von dem LKW-Staugebiet betroffen. Bei der Position $x/L = 0,77$ entsteht hinter dem Vorderrad und im Heckbereich noch ein Unterdruck; jedoch bei Position $x/L = 1,17$ erstreckt sich schon überall ein Überdruck, der vorne schwächer und hinten deutlich stärker ausgeprägt ist.

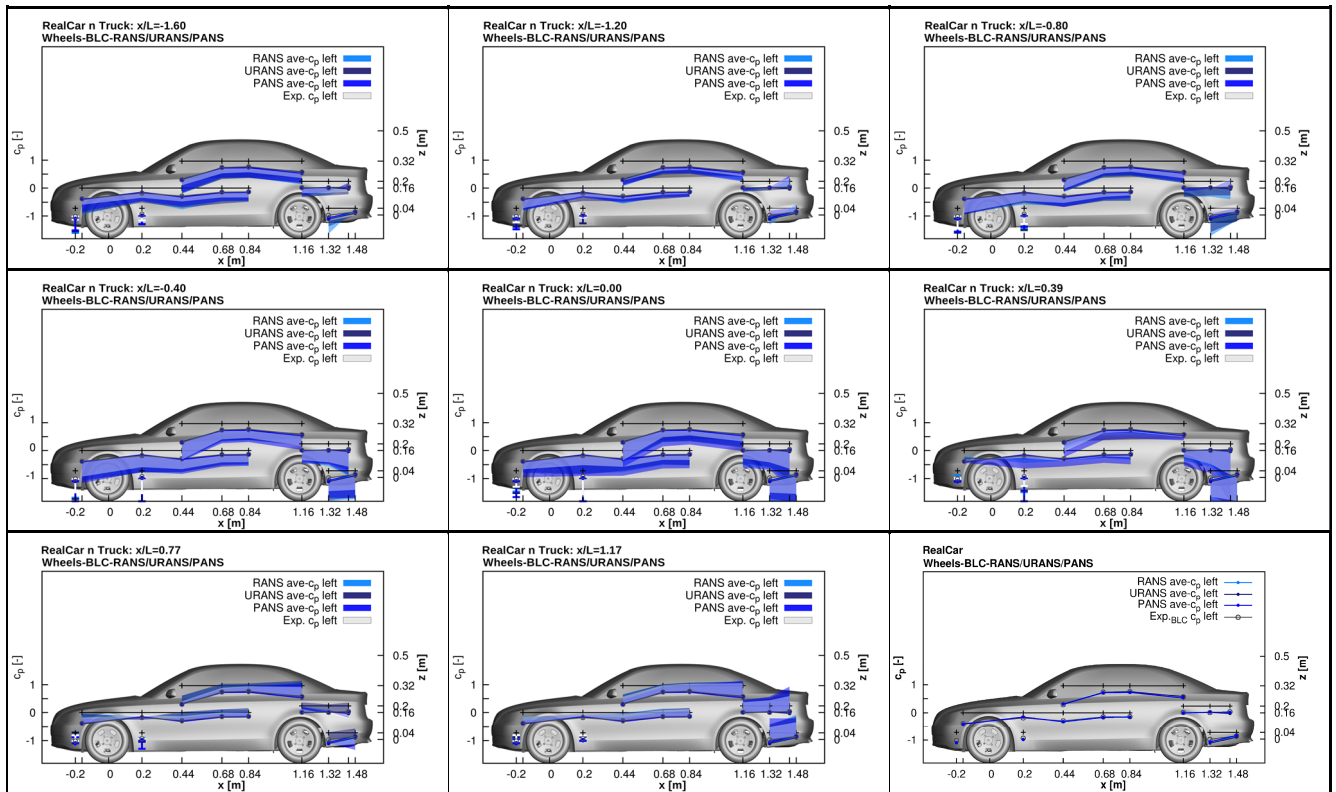


Bild 5.30: Die Druckveränderung bei der Überholung auf der linken Seite des PKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC im Vergleich zum Solofahrzeug in allen Positionen.

Das Bild 5.31 zeigt einen kompletten Verlauf des Druckbeiwertes c_p auf der Fahrzeugoberseite in den zwei symmetrischen Ebenen $y = -0,16m$ und $y = 0,16m$ und auf dem Unterboden in der Zentralebene $y = 0m$ von einzelnen Überholpositionen. Diese Abbildung ermöglicht einen Vergleich zwischen der rechten und linken Seite und zusätzlich auch zwischen der Oberseite und dem Unterboden. Ein kleinerer Druck auf der rechten Seite als auf der linken Seite, wie es bei den Positionen $x/L = -1,20$, $x/L = -0,80$ und $x/L = -0,40$ (bei PANS) der Fall ist, bedeutet eine positive Seitenkraft c_s , die das PKW-Modell Richtung LKW-Modell ansaugt. Umgekehrt, wenn der Druck an den Positionen $x/L = 0,39$ und $x/L = 0,77$ an der rechten Seite deutlich größer ist, deutet das auf eine negative Seitenkraft c_s hin, die wiederum das PKW-Modell abstößt. Die signifikanten Unterschiede bei den Simulationsverfahren entstehen hauptsächlich auf dem Unterboden. An den Positionen $x/L = -0,40$ und $x/L = 0,00$, an denen die größten Druckunterschiede auf dem Unterboden bei der PANS Simulation gegenüber der RANS und URANS Simulationen beobachtet werden, entsteht auch die größte Diskrepanz bei dem Auftrieb c_l zwischen PANS und den Simulationen RANS und URANS. Laut Experiment ist die Strömung unter dem Fahrzeugmodell schneller, was in den meisten Fällen der PANS Simulation gelingt abzubilden. An Stellen wie der Getriebetunnel oder die Abgasanlage, an denen der Druck größer, bzw. die Strömung langsamer wird, bieten wieder alle drei Simulationsverfahren eine gute Übereinstimmung miteinander und mit dem Experiment. Eine weitere Abweichung zwischen den Simulationsverfahren entsteht auf der Reserveradmulde, auf der die Strömung bei PANS mehr beschleunigt wird. Auf der Oberseite liefern die Simulationen in den Messpunkten meistens eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten. Zu größeren Abweichungen vom Experiment und auch bei den Simulationen untereinander kommt es auf der Heckscheibe und auf dem Kofferraumdeckel, wo sich der Haarnadelwirbel bildet und periodisch ins Totwasser abschwimmt. Diese Abweichungen bei RANS und URANS können an der nicht ausreichenden zeitlichen Mittelung liegen.

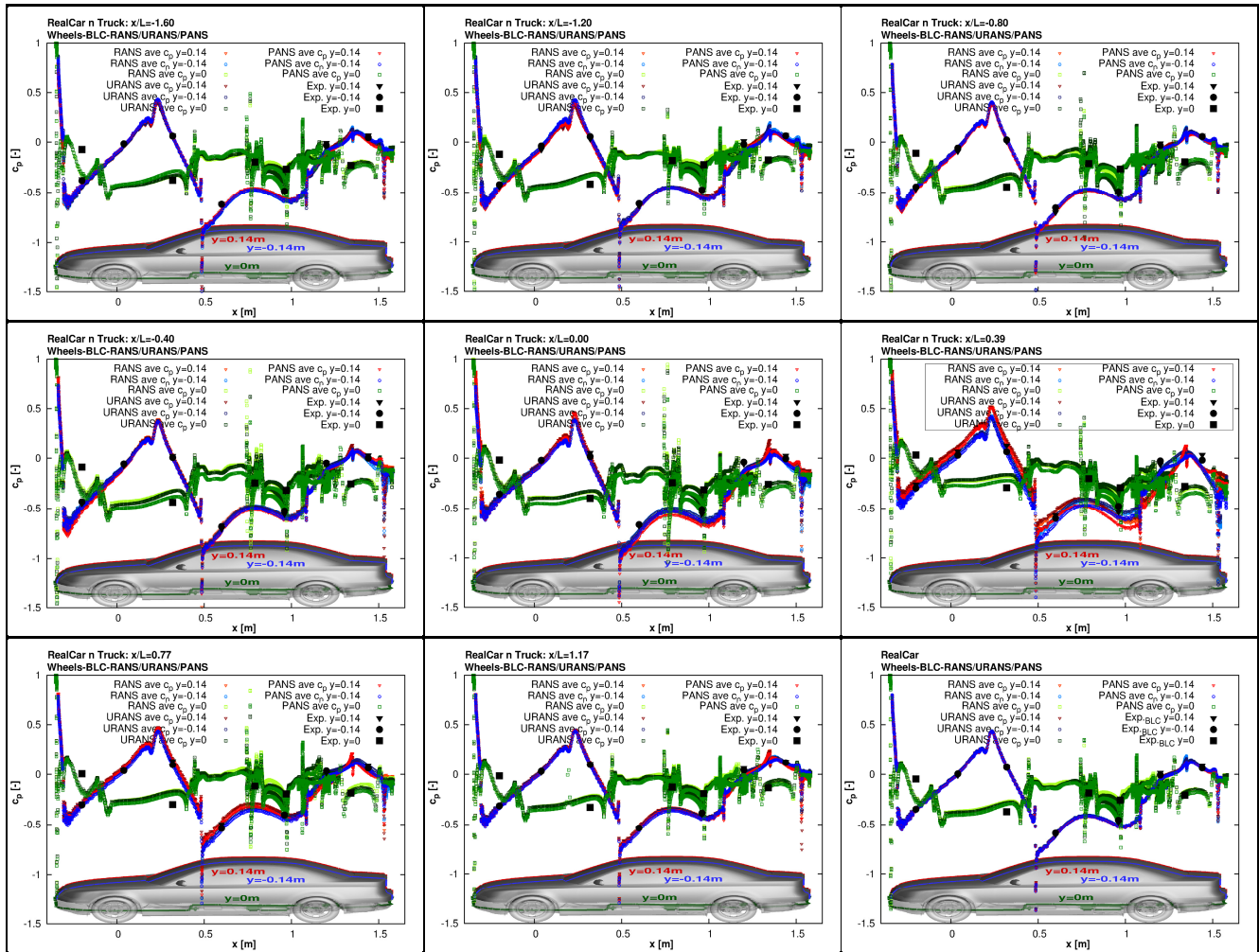


Bild 5.31: Verlauf des gemittelten Druckbeiwerts c_p auf der Ober- und Unterseite des PKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in allen Positionen der Überholung.

Wie die Druckverteilung an der rechten und linken Fahrzeugseite die Seitenkraft c_s und das Giermoment c_{M_z} beeinflusst, zeigt das Bild 5.32. Hier wird in jeder Überholposition eine Druckdifferenz zwischen der linken und rechten Seite auf der rechten Fahrzeugseite aufgetragen, wobei als Überdruck der größere Druck rechts als links bezeichnet wird, und umgekehrt der größere Druck auf der linken als auf der rechten Seite Unterdruck bedeutet. Durch graue Punkte, die durch Linien verbunden sind, wird die experimentell gewonnene Druckdifferenz zwischen der rechten und linken Seite aufgetragen. Die farbigen Flächen zeigen die Abweichungsrate der Simulationen vom Experiment.

Bei der ersten Überholposition $x/L = -1,60$ wird durch das Experiment in den meisten Messpunkten ein höherer Druck auf der rechten als auf der linken Seite gezeigt. Dieser Überdruck auf der rechten Seite verursacht eine negative Seitenkraft c_s . Die Abweichungen bei den Simulationen haben die Tendenz den Überdruck zu vermindern und so die Seitenkraft c_s zu neutralisieren. Bei den experimentellen Daten ist der Überdruck vorne kleiner und hinten größer, was ein positives Giermoment c_{M_z} verursacht, das mit dem Fahrzeugmodell im Uhrzeigersinn giert. Bei den RANS und PANS Simulationen ist die Druckdifferenz umgekehrt: vorne größer und hinten kleiner; und so ändert auch das Giermoment c_{M_z} sein Vorzeichen. Die richtige Orientierung des Giermoment c_{M_z} bei der URANS Simulation wird nicht durch Überdruck, sondern nur durch vorne stärkeren Unterdruck als hinten verursacht. Wenn sich das PKW-Modell bei der nächsten Position $x/L = -1,20$ dem LKW-Modell nähert, entsteht der sogenannte Saugeffekt. Der starke Unterdruck in der ersten Hälfte der rechten Fahrzeugseite verursacht eine erhebliche, positive Seitenkraft c_s . Ein in der vorderen Hälfte kleinerer Druck als in der hinteren, hat wieder ein positives Giermoment c_{M_z} zur Folge. Die Druckverminderung im Heckbereich neutralisiert das Giermoment c_{M_z} bei den Simulationen. Die Position $x/L = -0,80$ zeigt einen ausgeglichenen Unterdruck entlang der ganzen rechten Fahrzeugseite. So entsteht die stärkste positive

Seitenkraft c_s bei diesem Überholvorgang, während das Giermoment c_{M_z} vernachlässigbar bleibt. Bei diesen beiden Positionen $x/L = -1,20$ und $x/L = -0,80$ herrscht eine starke positive Seitenkraft c_s . Weil aber vom Fahrer das Gieren mehr als Parallelversatz wahrgenommen wird, wird die Position $x/L = -1,20$ einen größeren Einfluss auf die Fahrstabilität haben. Bei der nächsten Position $x/L = -0,40$ kommt es von vorne zu einem allmählichen Druckanstieg an der rechten Seite. Dadurch wandelt sich nach dem Experiment die vorher negative Seitenkraft c_s in eine positive Seitenkraft c_s um. Während der vordere Teil durch den Druckanstieg beeinflusst wird, herrscht hinten noch ein leichter Unterdruck. Durch diesen Druckunterschied entsteht ein negatives Giermoment c_{M_z} . Der starke Unterdruck vor und hinter dem Vorderrad bei der PANS Simulation verursacht, dass die Seitenkraft c_s bei dieser Position noch leicht positiv bleibt. Dieses Unterdruckgebiet bei dem Vorderrad hat auch zur Folge, dass das Giermoment c_{M_z} bei der PANS Simulation eine umgekehrte Orientation hat. Bei der Position $x/L = 0,00$ erhöht sich weiter der Überdruck in der vorderen Hälfte. Dadurch kommt es zur Verstärkung der negativen Seitenkraft c_s und des negativen Giermoments c_{M_z} . Der Überdruck an der rechten Seite wird bei den Simulationen zum Teil unterschätzt, wobei die PANS Simulation die kleinsten Abweichungen vom Experiment liefert. Das LKW-Staugebiet trifft bei der Position $x/L = 0,39$ direkt auf die vordere Fahrzeughälfte. Auf der rechten Seite entsteht vorne ein erheblicher Überdruck. Im hinteren Bereich, in dem das PKW-Modell von dem LKW-Modell noch geschützt wird, bildet sich an der rechten Seite ein niedrigerer Druck. Dieser Druckunterschied vorne und hinten verursacht das größte negative Giermoment c_{M_z} bei dieser Überholung. Durch die Simulationen wird sowohl der Überdruck als auch der Unterdruck stark überschätzt. Dank der starken Überschätzung des Überdruckes in dem vorderen Bereich entsteht bei den Simulationen die maximale negative Seitenkraft c_s bei diesem Überholvorgang. Bei der Position $x/L = 0,77$ herrscht entlang der ganzen rechten Fahrzeugseite ein Überdruck. Eine Ausnahme stellt die C-Säule dar, an der die Umströmung dem LKW-Modell ausweichen will und dadurch beschleunigt wird. Experimentell ist das die Position mit der maximalen negativen Seitenkraft c_s . Dank der ausgeglichenen Verteilung des Überdruckes entlang der rechten Seite reduziert sich das negative Giermoment c_{M_z} deutlich; und weil jetzt das LKW-Staugebiet sein Maximum im Heckbereich des PKW-Modell hat, entsteht sogar ein leicht positives Giermoment c_{M_z} . Bei der letzten Überholposition $x/L = 1,17$ trifft das LKW-Staugebiet das PKW-Modell mehr von hinten. Dadurch gleichen sich die Drücke an beiden Fahrzeugseiten an. Die Seitenkraft c_s und das Giermoment c_{M_z} werden minimiert. Die Abweichung des Giermoments c_{M_z} bei den Simulationen wird durch eine überschätzte Strömungsbeschleunigung im Heckbereich, die beim Ausweichen der Umströmung entsteht, verursacht.

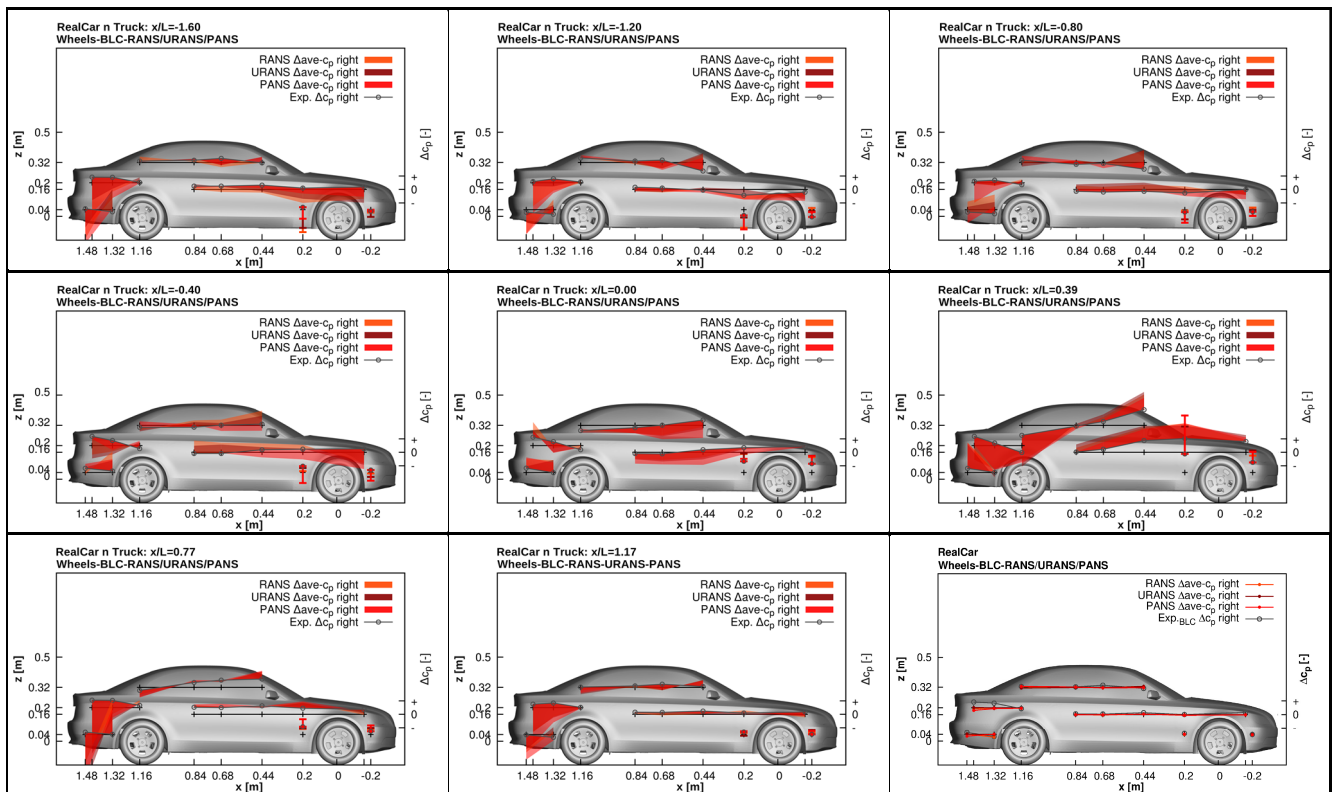
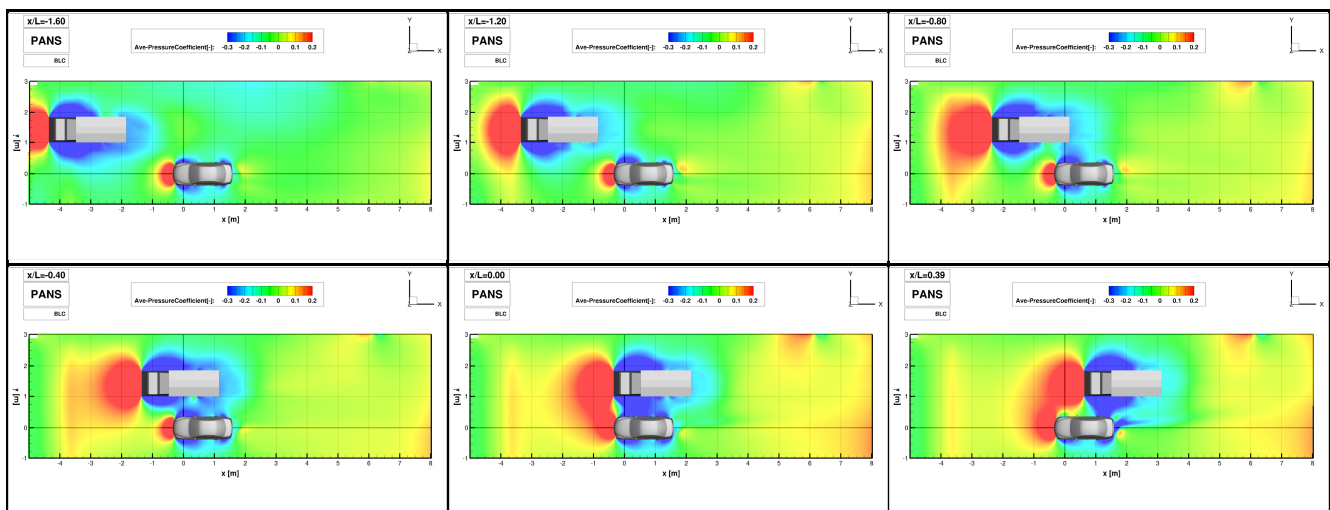


Bild 5.32: Druckdifferenz zwischen der rechten und linken Seite des PKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit *BLC* in allen Positionen der Überholung.

Generell hängen alle Luftwiderstandsbeiwerte von der Druckverteilung ab. Neben dem bereits diskutierten Auftrieb c_l und der Seitenkraft c_s wird nun mit Hilfe des Bild 5.28 die Abhängigkeit des Luftwiderstandes c_d erklärt. Bei der entferntesten Überholposition $x/L = -1,60$ ist der Druck auf dem Heck kleiner als bei einem Solofahrzeug. Das hat zur Folge, dass das Fahrzeugmodell bei dieser Position einen erhöhten Luftwiderstand c_d aufweist. Dies widerspricht aber der Theorie einer Windschattenfahrt und hat mehr mit Interferenzen des Windkanals zu tun. Bei den nächsten zwei Positionen $x/L = -1,20$ und $x/L = -0,80$, die näher dem LKW liegen, befindet sich das PKW-Modell im Unterdruckgebiet, das durch das LKW-Totwasser verursacht wurde. Dazu entsteht im Heck vor allem auf der linken Seite ein größerer Druck als bei dem Solofahrzeug. Der Luftwiderstand c_d bei diesen Positionen sinkt. Die rechte Heckseite wird von dem Saugeffekt beeinflusst. Wenn sich das PKW-Modell neben dem LKW-Modell befindet, das heißt in den Positionen $x/L = -0,40$, $x/L = 0,00$ und $x/L = 0,39$, entsteht ein immer größerer Unterdruck im Heck, der sein Maximum bei der Position $x/L = 0,39$ erreicht. Der Luftwiderstand c_d verhält sich in gleicher Weise und hat ebenso sein Maximum bei der Position $x/L = 0,39$. Der Grund dafür ist eine Beschleunigung der Strömung im Heck und Deformation des Totwassers, die durch die Interaktion zwischen den beiden Fahrzeugmodellen verursacht wird. Durch die Wirkung des LKW-Staugebietes auf das Heck verkleinert sich der Unterdruck wieder und der Luftwiderstand c_d bei der Position $x/L = 0,77$ sinkt. Bei der letzten Position $x/L = 1,17$ wirkt das LKW-Staugebiet von hinten direkt auf das Fahrzeugheck und verursacht dort damit einen größeren Druck als bei dem Solofahrzeug. Das PKW-Modell wird bei dieser Position durch das LKW-Staugebiet nach vorne geschoben; der Luftwiderstand c_d wird dadurch kleiner als bei einem alleinstehenden Fahrzeugmodell.

Eine Druckverteilung in der Nähe von beiden Fahrzeugmodellen zeigt das Bild 5.33. Der gemittelte Druckbeiwert c_p ist auf der Ebene $z = 0,08m$ abgebildet. Nach den vorherigen Druckvergleichen bei den drei Simulationsverfahren wurden die Ergebnisse der PANS Simulation, die die beste Übereinstimmung mit den experimentellen Daten geliefert hat, ausgewählt.

Zwischen den Positionen $x/L = -1,60$ und $x/L = -0,40$ entsteht bei dem PKW-Modell auf der rechten Seite vor dem Vorderrad ein größeres Unterdruckgebiet als links. Ab der Position $x/L = 0,00$ verkleinert sich das rechte Unterdruckgebiet, während das linke erhalten bleibt. Bei der Position $x/L = 0,00$ interagiert das rechte Unterdruckgebiet mit dem linken Unterdruckgebiet des LKWs am stärksten. Bei der nächsten Position $x/L = 0,77$ bleibt das rechte Unterdruckgebiet weiterhin kleiner als das linke. Bei der letzten Position $x/L = 1,17$ kommt es dann zum Druckausgleich vor der Vorderachse an beiden Fahrzeugseiten des PKWs. Hinter der Hinterachse vergrößern sich ab der Position $x/L = -0,40$ die Unterdrücke. Dieses rechte Unterdruckgebiet interagiert mit dem linken LKW-Unterdruckgebiet am stärksten. Bei den letzten Positionen $x/L = 0,77$ und $x/L = 1,17$ entsteht hinter der Hinterachse rechts ein größerer Unterdruck als links. Nicht nur das PKW-Modell wird von dem LKW-Staugebiet getroffen. Bei den Positionen $x/L = -0,80$, $x/L = -0,40$, $x/L = 0,00$ ist sichtbar wie das linke Unterdruckgebiet des LKW-Modells durch das PKW-Staugebiet verkleinert wird.



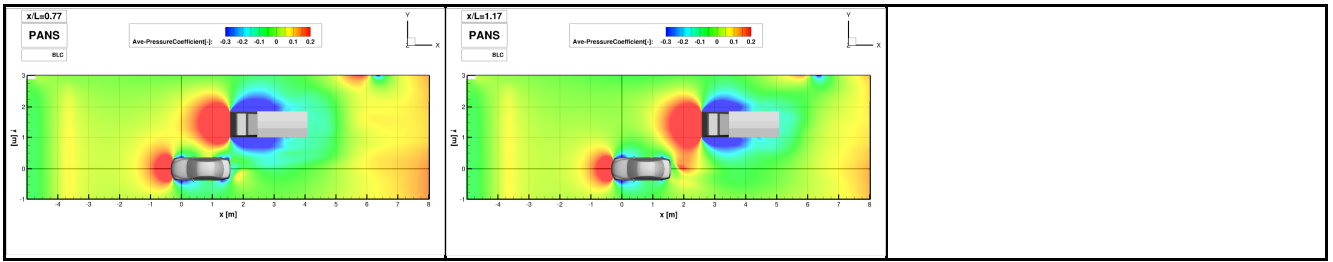


Bild 5.33: Vergleich des gemittelten Druckbeiwerts c_p in der horizontalen Ebene $z = 0,08m$ beim PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit *BLC* in allen Positionen der Überholung.

Eine CFD Simulation ermöglicht im Vergleich zum Experiment eine Auswertung des Druckbeiwertes c_p auf der ganzen Oberfläche des PKW-Modells. Dies stellt das Bild 5.34 für jede Überholposition dar. An den hinteren Positionen $x/L = -1,20$ und $x/L = -0,80$, an denen der Saugeffekt dominiert, lässt sich eine Unterdruckerhöhung bei dem rechten Scheinwerfer, dem rechten Kotflügel und dem rechten Vorderrad beobachten. Gleichzeitig erhöht sich bei den Positionen $x/L = -0,80$ und $x/L = -0,40$ der Unterdruck auf dem Dach. Unterdrücke in diesen Gebieten erreichen bei der Position $x/L = 0,00$ ihres Maximum. Dazu bilden sich bei dieser Position stärkere Unterdrücke auf der C-Säule, an dem hinteren Rad und am Kotflügel. Diese Unterdrücke sind bei der nächsten Position $x/L = 0,39$ am stärksten. Weil die vordere Fahrzeughälfte bei dieser Position von dem LKW-Staugebiet getroffen wird, entsteht auf der A-Säule und auf dem Dach ein deutlich kleinerer Unterdruck und auf dem vorderen Kotflügel herrscht Überdruck. Bei den letzten zwei vorderen Positionen $x/L = 0,77$ und $x/L = 1,17$ schwächt sich die Wirkung des LKW-Staugebietes wieder leicht ab. Bei der Position $x/L = 0,77$ verbleiben wegen der Ausweichung der Umströmung die Unterdrücke auf der C-Säule und an dem Hinterrad. Dazu entwickelt sich noch ein Unterdruckgebiet auf der rechten Seite der Heckstoßstange. Auf dem Dach ist der Druck gestiegen und auf der A-Säule bildet sich wieder ein leichter Unterdruck. Bei der Position $x/L = 1,17$ steht das PKW-Modell immer unter dem Einfluss von dem LKW-Staugebiet. Auf der Fahrzeugoberfläche herrschen größere Drücke als bei einem Solofahrzeug.

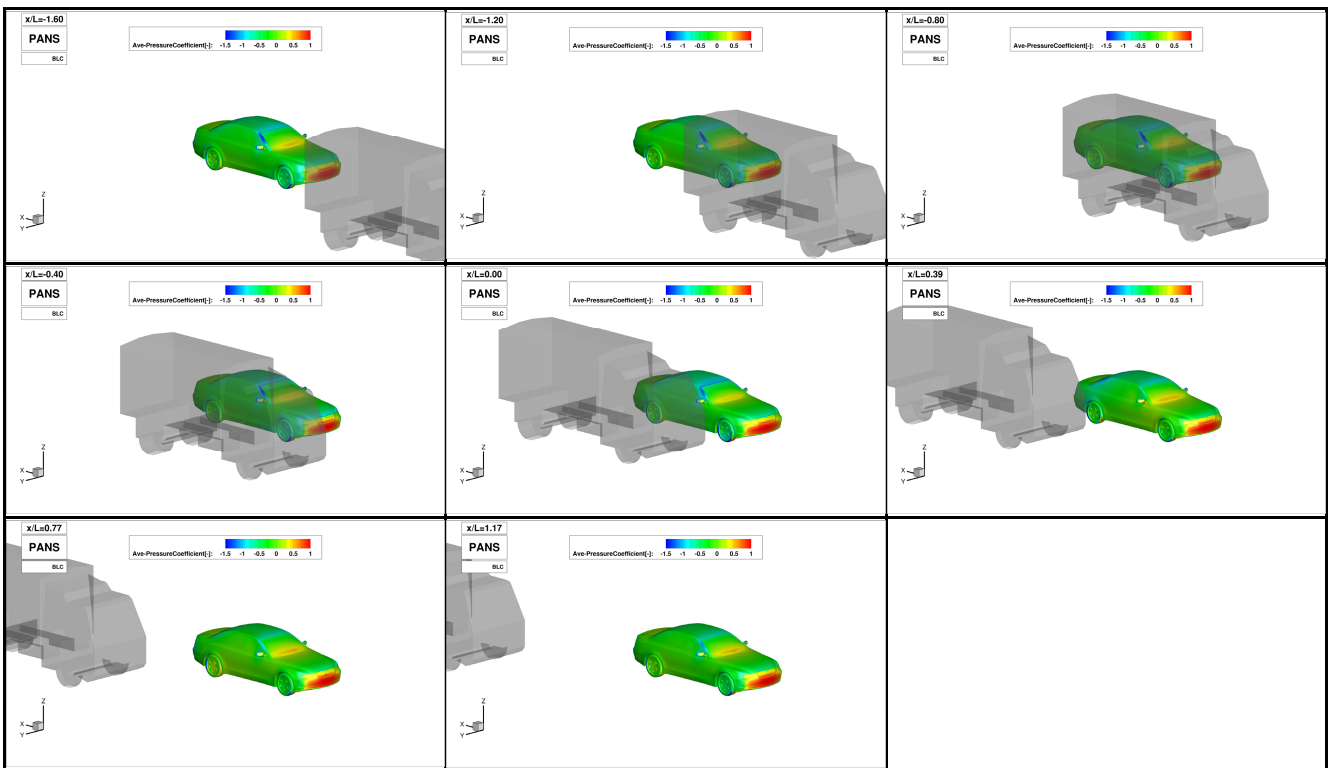


Bild 5.34: Vergleich des gemittelten Druckbeiwerts c_p auf der Oberfläche des PKWs beim PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit *BLC* in allen Positionen der Überholung.

Weil die Luftwiderstandsbeiwerte c_d , c_s und c_l sowie der Druckbeiwert c_p von der Strömungsgeschwindigkeit abhängig sind, wird deren Verhalten bei dem Überholvorgang in Verbindung mit der Umströmung gebracht.

Nach vorherigen Erkenntnissen erfolgt diese Strömungsanalyse anhand der PANS Simulationen *Wheels-BLC-PANS*.

Zuerst wird auf dem Bild 5.35 eine Situation in dem ganzen Windkanal gezeigt, in der auf der Ebene $z = 0,08m$ die gemittelte Geschwindigkeit abgebildet ist. Der erhöhte Luftwiderstand c_d bei dem PKW-Modell in der Position $x/L = -1,60$, der einer Windschattenfahrt widerspricht, wurde auf eine mögliche Interferenz mit dem Windkanal zurückgeführt. Das Strömungsbild zeigt dadurch, dass das LKW-Modell zu nah dem Düsenaustritt positioniert ist. Der Freistahl kann ihm rechts nicht genügend ausweichen, so wie das bei der anderen Positionen der Fall ist. Die Strömung wird rechts gedrosselt und beim Erhalten von gleichem Volumenstrom wird sie auf der linken Seite schneller und trifft dann auf das PKW-Modell. Die Annahme einer Strömungsverdrosselung an der rechten Seite unterstützt die stärkere Durchmischung des Freistrahls mit der ruhenden Luft. Die Stromlinien zeigen, dass die Strömung in dem LKW-Nachlauf dadurch stark nach links in Richtung Mitte des Kollektoreintritts geneigt ist. Bei der Position $x/L = -1,60$ befindet sich das PKW-Modell in dem LKW-Nachlauf und durch die abgeneigte Strömung wirkt auf ihn die negative Seitenkraft c_s . Diese Verdrosselung kann auch die negative Seitenkraft c_s des LKW-Modells bei den ersten zwei Überholpositionen $x/L = -1,60$ und $x/L = -1,20$ verursachen. Bei den Positionen $x/L = -1,20$ und $x/L = -0,80$ bleibt die Strömung in dem LKW-Nachlauf immer leicht nach links abgeneigt. Die Strömung in dem PKW-Nachlauf weist die gleiche Tendenz auf. An der Position $x/L = -0,40$ entsteht hinter beiden Fahrzeugmodellen ein symmetrischer Nachlauf; Stromlinien, die zwischen beiden Fahrzeugen verlaufen, behalten ihren geraden Verlauf. Je näher das LKW-Modell dem Kollektoreintritt angebracht ist, desto mehr wird sb dieser Position die Strömung in das Plenum abgeleitet. Bei den weiteren Positionen $x/L = 0,00$ und $x/L = 0,39$ ändert sich die Strömungsneigung in beiden Nachläufen und tendiert mehr nach rechts. Bei den letzten zwei Positionen bildet sich überwiegend eine symmetrische Strömung im Kollektor. Bei jeder Position sind auf dieser horizontalen Ebene Spuren der Grenzschichtabsaugung *BLC* direkt nach dem Düsenaustritt sichtbar; die Strömung wird dadurch an dieser Stelle beschleunigt. Im Plenum kommt es zu einer leichten Rezirkulation der ruhenden Luft. Die Ausdehnung des Freistrahls, die im Plenum stattfindet und eine Auswirkung auf die Luftwiderstände beider Fahrzeuge hat, wäre bei klassischen Simulationen mit einer rechteckigen Domäne nicht reproduzierbar.

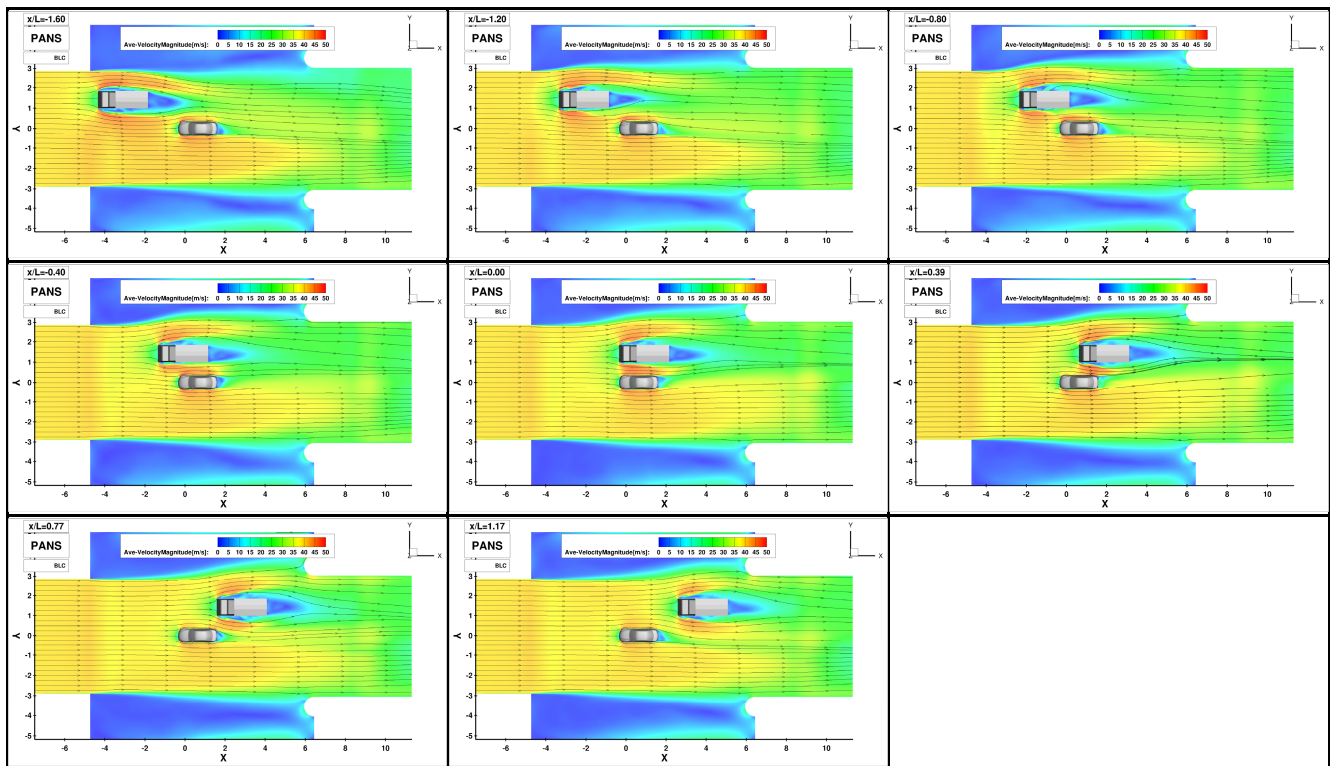


Bild 5.35: Vergleich der gemittelten Geschwindigkeit in der horizontalen Ebene $z = 0,08m$ beim PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit *BLC* in allen Positionen der Überholung.

Für eine nähere Untersuchung der Wechselwirkung zwischen beiden Fahrzeugmodellen während des Überholvorgangs wurde auf dem Bild 5.36 eine nähere Ansicht gewählt. Im Vergleich mit dem vorherigen Bild

5.35 wurde hier auf der Ebene $z = 0,08m$ die gemittelte Geschwindigkeitskomponente u aufgetragen, damit die Strömungsrichtung im Totwasser besser sichtbar wird. Bei der ersten Position $x/L = -1,60$ kann die Strömung, die gerade aus der Düse rauskommt, an der rechten Seite des LKW-Modells nicht ausreichend ausweichen, so wie das bei anderen Positionen der Fall ist. Die Strömung ist näher an das LKW-Modell angelegt und verkleinert somit das rechte Umströmungsgebiet. Die Strömung in beiden Nachläufen ist nach links geneigt; dadurch sind auch die LKW- und PKW-Totwasser nicht mehr symmetrisch und ihre Rezirkulationszonen wandern ebenso nach links. Bei dem PKW-Modell befindet sich links eine schnellere Strömung als rechts. Bei den weiteren zwei Positionen $x/L = -1,20$ und $x/L = -0,80$ entwickelt sich auf der rechten LKW-Seite schon ein reguläres Umströmungsgebiet mit einer Ablösung an der Fahrerkabine. Das Umströmungsgebiet an der linken LKW-Seite wird im Gegensatz dazu durch die Wirkung des PKW-Staugebietes deutlich reduziert. Zwischen beiden Fahrzeugmodellen entsteht bei diesen Positionen eine Durchströmung, die über eine höhere Geschwindigkeit als in der restlichen Strömung verfügt, und damit einen Saugeffekt verursacht. Die Strömung in den beiden Nachläufen bleibt nach links geneigt und verschiebt weiterhin die Rezirkulationszone im PKW-Totwasser nach links. Das LKW-Totwasser wirkt symmetrischer. Unter dem Einfluss vom PKW-Staugebiet ist es bei der Position $x/L = -1,20$ schwächer ausgeprägt. Bei den nächsten Positionen $x/L = -0,40$, $x/L = 0,00$ und $x/L = 0,39$, bei denen das PKW-Modell neben LKW-Modell steht, verbleibt zwischen beiden Fahrzeugen eine Durchströmung, die die benachbarten seitlichen Ablösungen deutlich verkleinert. Sie hat aber eine vergleichbare Geschwindigkeit mit der Umströmung an den anderen Fahrzeugseiten und somit keine Auswirkung auf die Seitenkraft c_s . Bei diesen drei Positionen wandert die Rezirkulationszone im PKW-Totwasser nach rechts zusammen mit der Neigung des PKW-Nachlaufs. Durch die Wirkung des LKW-Staugebietes wird bei der vorletzten Position $x/L = 0,77$ das PKW-Totwasser abgeschwächt. Zwischen der LKW-Front und dem PKW-Heck entsteht eine starke Umlenkung der Durchströmung, die die Rezirkulationszone des PKW-Totwassers wieder leicht nach links verschiebt. Das Ablösungsgebiet an der Fahrerkabine bleibt davon unbeeinflusst; bei dieser Position entwickelt sich eine symmetrische Umströmung um das LKW-Modell. Bei einer Vergrößerung der Lücke zwischen den beiden Fahrzeugen in der Position $x/L = 1,17$ bildet sich an dieser Stelle eine breitere Durchströmung, die in der Lage ist, den PKW-Nachlauf nach links umzulenken. Durch die Wirkung des LKW-Staugebietes bleibt auch die Rezirkulationszone des PKW-Totwassers nach links verschoben. Die Umströmung des LKWs bietet wieder ein symmetrisches Bild.

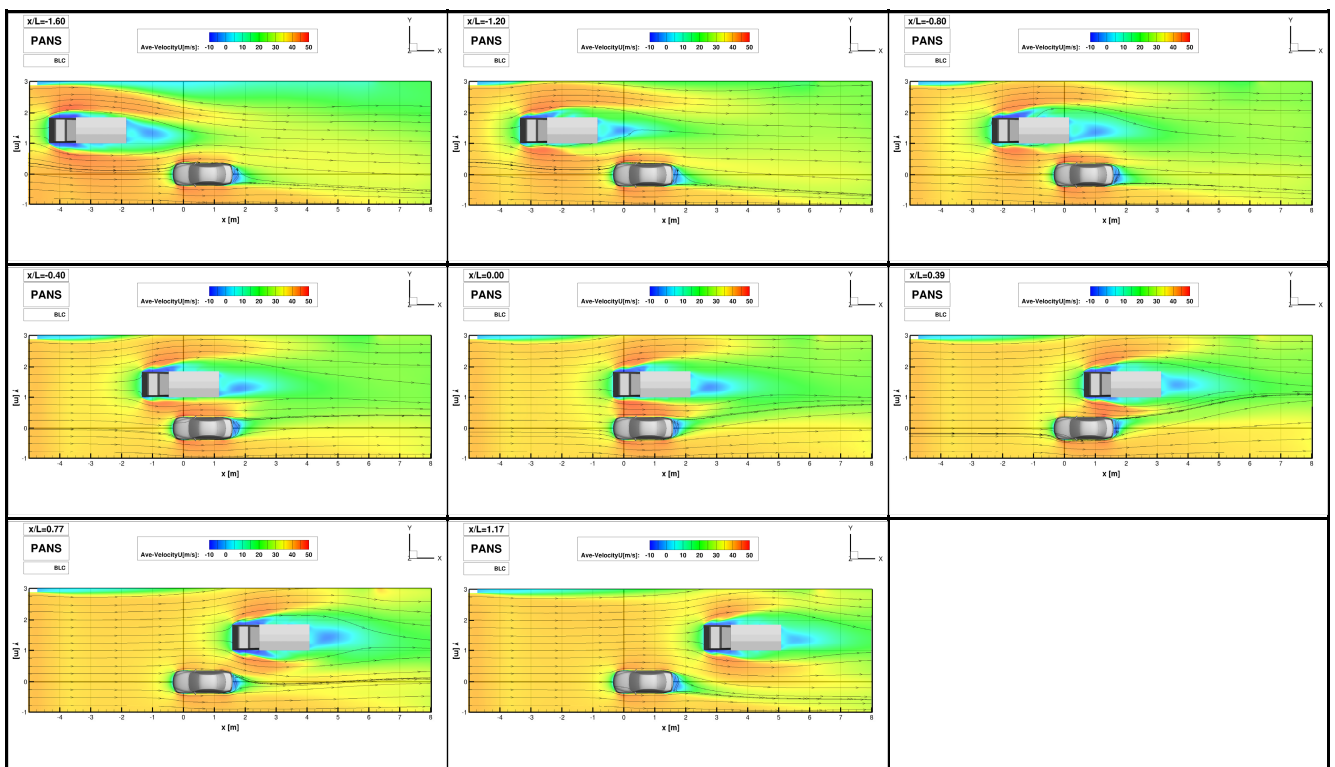
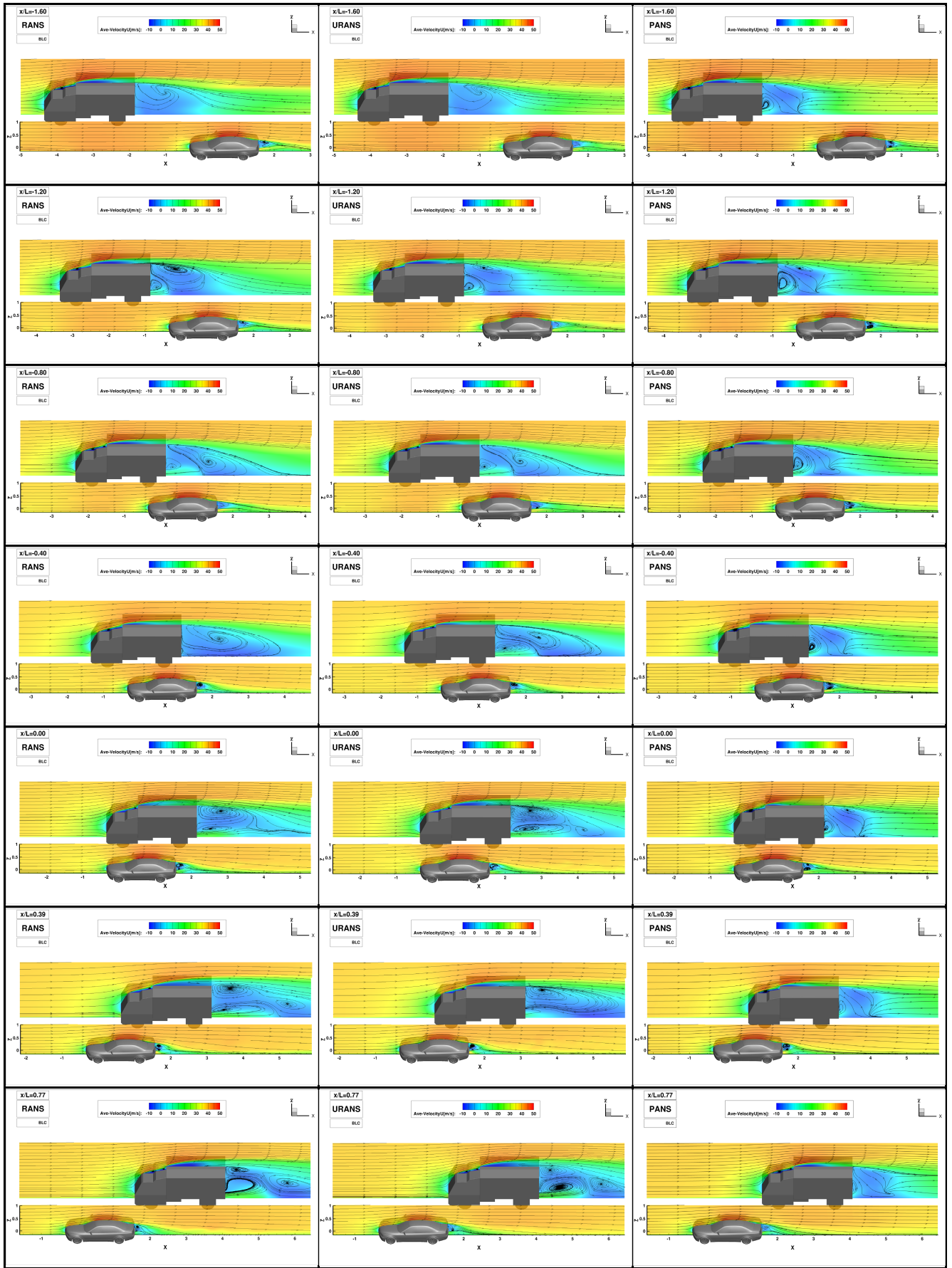


Bild 5.36: Vergleich der gemittelten U -Geschwindigkeit in der horizontalen Ebene $z = 0,08m$ beim PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in allen Positionen der Überholung.

Nach einer Strömungsanalyse in einer Horizontalebene folgt eine Analyse der Strömung in den zwei Vertikalebene $y = 0m$ und $y = 1,432m$, die die Längsmittelschnitte bei beiden Fahrzeugmodellen darstellen. Damit die Rückströmung im Totwasser sichtbar wird, wurde wieder die Darstellung der gemittelten Geschwindigkeitskomponente u ausgewählt. Dazu wird die Betrachtung der Strömung auf alle drei Simulationsverfahren RANS, URANS und PANS erweitert. Auf dem Bild 5.37 sind beide Längsmittelschnitte von jeder Position und allen drei Simulationsverfahren gezeigt. Bei allen Positionen ist ersichtlich, dass das LKW-Totwasser bei PANS deutlich kürzer als bei RANS und URANS ist. Dieses Verhalten ist nach näherer Untersuchung auch in dem PKW-Totwasser sichtbar und wurde schon im Kapitel 4.2.1.3 angesprochen. Bei der ersten Position $x/L = -1,60$ bildet sich hinter dem PKW ein langer Nachlauf mit Totwasser. In dem PKW-Totwasser kann nur die PANS Simulation die beiden Spuren des Ringwirbels wiedergeben. Bei RANS bildet sich nach der Mittelung nur der obere Wirbel aus dem Wirbelpaar, der meistens stärker ausgeprägt ist. In dem LKW-Totwasser bildet sich bei PANS nur der untere Wirbelkern, der bei Umströmung eines Nutzfahrzeuges dominant ist. Die Abwesenheit des Wirbelkerns bei RANS und URANS deutet auf ein asymmetrisches Totwasser hin. Bei der nächsten Position $x/L = -1,20$ verbleibt ein langer Nachlauf hinter dem PKW. Die Situation im PKW-Totwasser bei den drei Simulationen ist gleich wie bei der vorherigen Position. Im Vergleich mit der vorherigen Position entsteht nun hinter dem LKW ein symmetrisches Totwasser mit zwei sichtbaren Wirbelkernen gegenläufig drehender Wirbel. Weil der LKW durch einen starken Abtrieb geprägt ist, sollte sich aus der schnelleren Strömung unter dem Fahrzeug entsprechend ein größerer Wirbel bilden als der, der sich aus dem Laderaum ablöst. Diese Eigenschaft kann bei dieser Position nur die PANS Simulation wiedergeben. Die RANS und URANS Simulationen zeigen eine starke Rezirkulation im oberen Bereich des Totwassers. Bei der Position $x/L = -0,80$, bei der der PKW neben dem LKW-Totwasser steht, ist bei weiterer Verschiebung des PKW-Totwassers nach links nur bei PANS das Wirbelpaar sichtbar. Bei URANS befindet sich in dem Mittelschnitt nur der untere Wirbelkern. Bei dieser Position ist deutlich zu sehen, wie die Unterbodenströmung hinter dem LKW stark nach oben gekrümmt wird. Hinter dieser Umlenkung bildet sich eine weitere Rezirkulationszone. Bei PANS entsteht kein Wirbelkern in der oberen Hälfte des Totwassers. Bei RANS und URANS wandert der Wirbel, der sich normalerweise an dem Laderaum ablöst, weiter nach hinten und vereint sich mit der hinteren Rezirkulationszone. Die Abbildung bei RANS und URANS ist fraglich; damit entspricht die Darstellung nach PANS mehr der Theorie. Bei den Positionen, bei denen der PKW neben dem LKW steht, wandert das PKW-Totwasser nach rechts und der Ringwirbel kann durch die Zentralebene besser erfasst werden. Bei der Position $x/L = -0,40$ wird durch PANS wieder ein Wirbelpaar abgebildet. RANS und URANS reproduzieren nur den ausgeprägteren oberen Wirbel. Bei dieser Position fängt der PKW-Nachlauf an sich zu verkleinern. In dem LKW-Totwasser herrschen gleiche Bedingungen wie bei der vorherigen Position. Nur bei PANS wird inkorrekterweise ein großer Wirbel abgebildet. Durch die Wirkung des PKW-Staugebietes an den LKW verkleinern sich die Wirbeln auf dem Fahrerhaus und dem Aufbau. Bei den nächsten zwei Positionen $x/L = 0,00$ und $x/L = 0,39$ verkleinert sich der PKW-Nachlauf weiter. Die Wirbelkerne des Wirbelpaars in dem PKW-Totwasser sind mehr zentral positioniert und werden bei allen Simulationen gut erfasst. Die Abbildung des LKW-Totwassers bei PANS entspricht in beiden Positionen mehr der Theorie. RANS und URANS überschätzen den oberen Wirbel deutlich. Bei den letzten Positionen $x/L = 0,77$ und $x/L = 1,17$, bei denen der PKW vor dem LKW steht, wandert das PKW-Totwasser wieder nach links. In der Position $x/L = 0,77$ sind bei RANS und URANS zwei bzw. ein Wirbelkern in der Zentralebene sichtbar. Bei PANS ist der Ringwirbel noch mehr nach links verschoben; die Zentralebene zeigt nur seinen Sattelpunkt. Aus dem PKW-Totwasser schwimmt ein verkleinerter nach unten gedrückter Nachlauf ab. Bei der Position $x/L = 1,17$ vergrößert sich erneut der PKW-Nachlauf und hinterlässt eine dickere Grenzschicht. Bei PANS wird das Wirbelpaar wieder gut erfasst. Bei RANS und URANS wird der obere Wirbel ausgeprägter. Bei beiden Positionen wird der LKW-Nachlauf durch PANS wieder getreu nachgebildet. Bei RANS und URANS dominiert in dem LKW-Nachlauf in der Position $x/L = 0,77$ zwar korrekterweise der untere Wirbel aus dem Wirbelpaar; hinten entwickelt sich aber ein dritter Wirbel, dessen Existenz fraglich ist. Bei der Position $x/L = 1,17$ wird durch RANS und URANS wieder der obere Wirbel inkorrekt deutlich überschätzt.



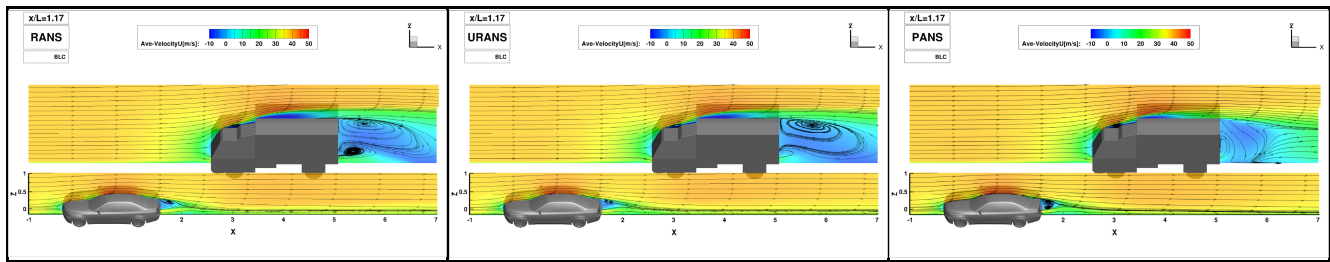


Bild 5.37: Vergleich der gemittelten U -Geschwindigkeit im PKW- und LKW-Längsmittelschnitt bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in allen Positionen der Überholung.

Die auf dem Bild 5.37 beschriebenen Strukturen in dem PKW- und LKW-Totwasser sind das Ergebnis einer zeitlichen Mittelung der Strömung. Laut Theorie bildet sich in beiden Totwässern ein Ringwirbel, dessen Spuren auf der vertikalen Ebene als zwei gegenläufig drehende Wirbel sichtbar sind. Bei Umströmung eines Lastwagens ist dank dem hoch positionierten und relativ glatten Unterboden die Strömung unterhalb des Wagens schneller als oberhalb. Im Totwasser dominiert deswegen stark der untere Wirbel aus dem Wirbelpaar.

Bei einer Momentaufnahme lösen sich die Wirbel an den Heckkanten stochastisch ab und schwimmen periodisch in den Nachlauf ab. Solch eine Situation zeigt das Bild 5.38 bei der ausgewählten Position $x/L = 0,39$ für alle drei Simulationsverfahren. Die PANS Simulation zeigt zum Zeitpunkt $t = 20,6s$ im PKW-Totwasser einen angelegten Unterkantenwirbel und einen bereits abgelösten Oberkantenwirbel. Beim LKW sind ein unterer Wirbel, der am Heck angelegt ist, und zwei abschwimmende Oberkantenwirbel sichtbar. Dazu sind anhand der Geschwindigkeitskonturen zahlreiche Fluktuationen im Totwasser erkennbar. Diese Strömungsabbildung in einer Momentaufnahme entspricht am besten der Theorie. Im Gegensatz zu PANS kann RANS nur Grobstrukturen abbilden, die einen stationären Charakter haben. In der 8000sten Iteration bilden sich in beiden Totwässern stark ausgeprägte Wirbelpaare. RANS kann nur eine statische zeitunabhängige Lösung bieten. URANS berücksichtigt zwar die zeitliche Änderung der Umströmung, ist aber ebenso wie RANS an die Modellierung der Grobstrukturen begrenzt. In der 20,6sten Sekunde wird in dem PKW-Totwasser das periodische Wachstum der gegenläufig drehenden Wirbel sichtbar. Im LKW-Totwasser befinden sich je zwei Ober- und Unterkantenwirbel.

Die langsame Dissipation der Grobstrukturen und die geringe Anzahl der Proben für die Mittelung führen vor allem beim LKW zu einer fehlerhaften Abbildung der gemittelten Wirbelstrukturen, bei der die abgeschwommenen mit den noch nicht abgelösten Strukturen verschmolzen werden.

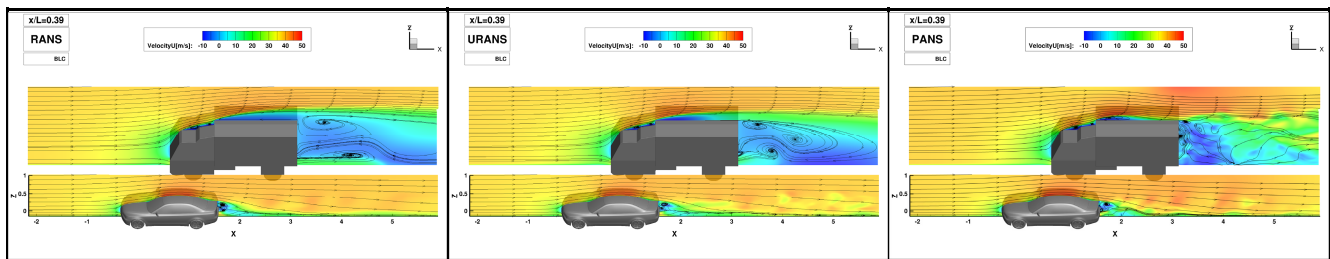
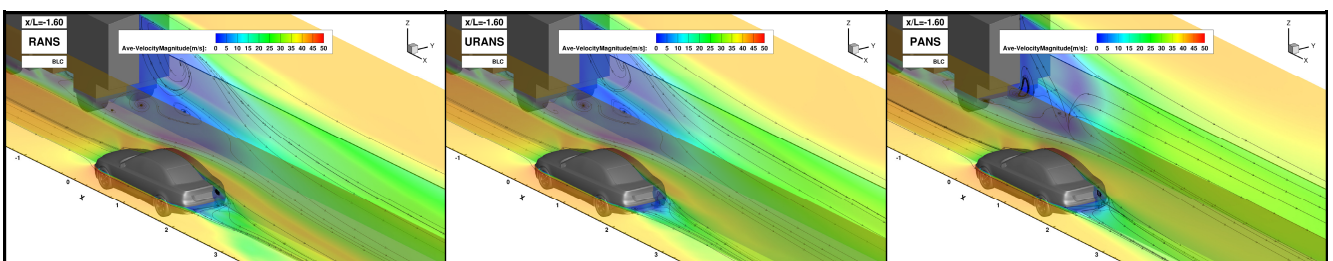


Bild 5.38: Vergleich der augenblicklichen U -Geschwindigkeit im PKW- und LKW-Längsmittelschnitt beim PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in der Position $x/L = 0,39$.

Bis jetzt wurden das Totwasser und der Nachlauf immer zweidimensional dargestellt und die horizontalen und vertikalen Strukturen separat betrachtet. Auf dem nächsten Bild 5.39 wird insbesondere bei dem PKW versucht, das Totwasser dreidimensional abzubilden. Die horizontale Ebene $z = 0,08m$ und die vertikale Ebene $y = 0,1m$ wurden von dem Solofahrzeug aus dem Kapitel 4.2.1.3 übernommen. Dort waren das Stellen, an denen der Ringwirbel am meisten ausgeprägte Spuren hatte. Die vertikale Ebene bei dem LKW verbleibt die Zentralebene $y = 1,432m$. Die Strömung wird durch die gemittelte Geschwindigkeit und durch Stromlinien visualisiert. Die Stromlinien haben zum Ziel die Strömungsumlenkung bei den Überholpositionen darzustellen. In der ersten Überholposition $x/L = -1,60$ wird die Strömung hinter dem PKW stark nach links abgelenkt. Die Strömung wird hinten rechts deutlich mehr beschleunigt als hinten links, was auch der kleinere Druck hinten rechts beweist (siehe Bild 5.32). Die Stromlinien bei RANS und PANS zeigen gemeinsam eine stärkere Strömungsablenkung hinter dem PKW als bei URANS. Dies korrespondiert mit der Druckverteilung im

Totwasser, bei der RANS und PANS die stärkeren Unterdrücke aufweisen als URANS (siehe Bild 5.28). Stromlinien, die den LKW umströmen, weichen mehr von der linken Seite ab. Hinter dem LKW werden sie unter dem Einfluss des PKW wieder nach rechts abgelenkt. Bei der nächsten Position $x/L = -1,20$ bleiben die Stromlinien hinter dem PKW stark nach links abgelenkt. Der deutlich größere Unterdruck rechts hinten bei RANS und PANS als bei URANS (siehe Bild 5.32) unterstützt die Geschwindigkeitsverteilung im Totwasser, bei der bei URANS niedrigere Werte auf der rechten Seite auftreten. Bei RANS herrscht im Heck eine größere Geschwindigkeit als bei URANS und PANS, was auch dem Überdruck in dem linken Messpunkt bei RANS entspricht (siehe Bild 5.28). Im Vergleich zu der vorherigen Position sind die Stromlinien an den LKW angelegt. Bei der URANS Simulation weichen die Stromlinien hinter dem LKW mehr dem PKW aus. Die experimentellen Daten zeigen in der Position $x/L = -0,80$ die höchste positive Seitenkraft c_s bei dem PKW. Die Größe der Seitenkraft c_s steht im Zusammenhang mit der Druckverteilung und der Strömungsumlenkung im Heck. Bei einer maximalen Seitenkraft c_s sollte der Nachlauf auch stark umgelenkt werden, was auch der experimentell gemessene Unterdruck rechts und der Überdruck links am Heck unterstützt. Die Strömungsumlenkung schafft nur PANS korrekt abzubilden. RANS und URANS zeigen bei dieser Position einen mehr symmetrischen Nachlauf hinter dem PKW. Die PANS Simulation zeigt rechts hinten, während RANS und URANS dort einen Überdruck aufweisen (siehe Bild 5.32), auch einen Unterdruck und im Heck links, wo RANS und URANS Unterdrücke haben (siehe Bild 5.28), einen leichten Überdruck. Somit trifft PANS auch die experimentell gemessene Seitenkraft c_s besser. In dem LKW-Nachlauf weichen die Stromlinien dem PKW bei PANS aus, während sie sich bei RANS und URANS mehr ausdehnen und sich das LKW-Totwasser in Richtung PKW verbreitet. Bei der Position $x/L = -0,40$ verschiebt sich bei allen drei Simulationsverfahren die Strömungsumlenkung hinter dem PKW nach rechts. Hinten rechts wird ein kleinerer Unterdruck als hinten links beobachtet (siehe Bild 5.32); die Strömung wird hinten links mehr beschleunigt. Sowohl die größeren Geschwindigkeitswerte im Totwasser als auch der größte Unterdruck in dem linken Messpunkt am Heck (siehe Bild 5.28) weist auf eine schnellere Strömung im PKW-Totwasser bei RANS hin. Das LKW-Totwasser weicht stärker bei RANS und URANS nach links ab als dies bei PANS der Fall ist. Die Totwassergebiete beider Fahrzeuge nähern sich und interagieren miteinander. Die Strömung hinter dem PKW wird bei der Position $x/L = 0,00$ noch stärker nach rechts abgelenkt. Hinten rechts entsteht ein kleinerer Unterdruck als hinten links (siehe Bild 5.32) und die Strömung wird hinten links wie bei der vorherigen Position mehr beschleunigt. RANS, URANS und PANS treffen alle drei die Strömungsablenkung, den größeren Druck hinten rechts als hinten links und die Unterdrücke am Heck (siehe Bild 5.28) gleich gut. Hinter dem LKW entsteht bei dieser Position ein symmetrisches Totwasser; die Stromlinien der Umströmung sind an den LKW angelegt. Bei der Position $x/L = 0,39$ beleibt die Strömung hinter dem PKW weiter nach rechts abgelenkt. Weil die Strömung zwischen den beiden Fahrzeugen beschleunigt wird, entsteht hinten rechts nur noch ein leicht größerer Druck als links (siehe Bild 5.32). Im Totwasser ist links die Strömung schneller als rechts, was mit einem größeren Unterdruck im linken Messpunkt als in dem rechten korrespondiert (siehe Bild 5.28). Bei dieser Position liefern alle drei Simulationen ein qualitativ gleiches Bild. In der Position $x/L = 0,77$, bei der der PKW vor dem LKW steht und das LKW-Staugebiet auf den PKW wirkt, strömt es im Totwasser direkt am Heck immer noch von links nach rechts. Durch das LKW-Staugebiet wird aber die Strömung dann gleich wieder nach links umgelenkt und weicht somit dem Überdruckgebiet aus. Durch diese Strömungsausweichung entsteht hinten rechts ein deutlich stärkerer Unterdruck als links (siehe Bild 5.32). Das PKW-Totwasser wird von dem LKW-Staugebiet bei RANS mehr getroffen; bei dem rechten Messpunkt wird ein Überdruck angezeigt (siehe Bild 5.28). Das Totwasser bei RANS wirkt wegen einer erhöhten Geschwindigkeit in der Mitte abgeschwächt. Bei der letzten Position $x/L = 1,17$ setzt sich die Wirkung des LKW-Staugebietes durch. Im Heck entsteht ein Überdruck, der links größer ist als rechts (siehe Bild 5.28). Wegen der Ausweichung der Strömung wird diese rechts mehr beschleunigt und im Totwasser strömt es von rechts nach links. Dabei entsteht hinten rechts ein stärkerer Unterdruck als hinten links (siehe Bild 5.32). Durch den Überdruck wird das Totwasser bei allen Simulationen deutlich abgeschwächt.



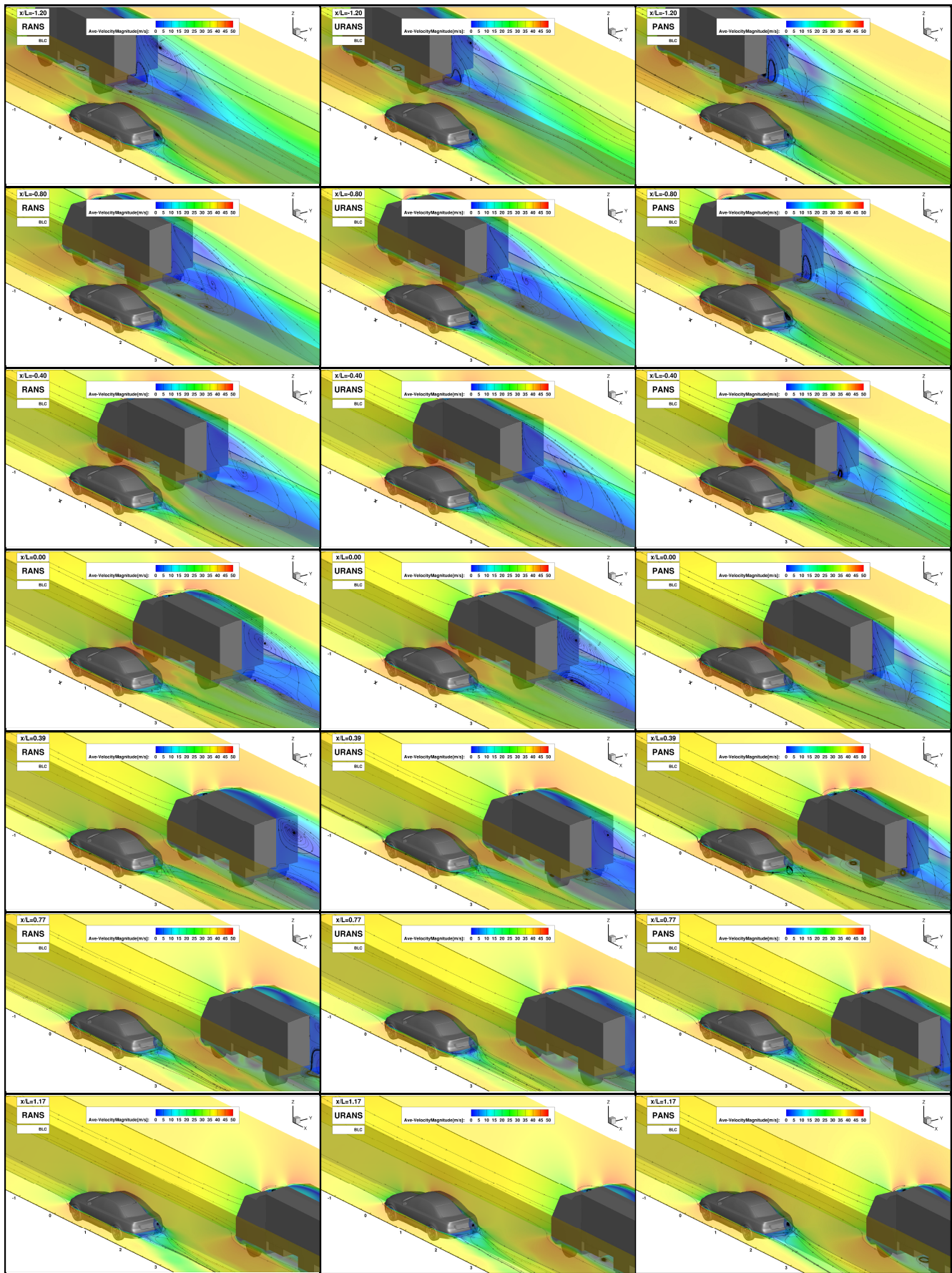
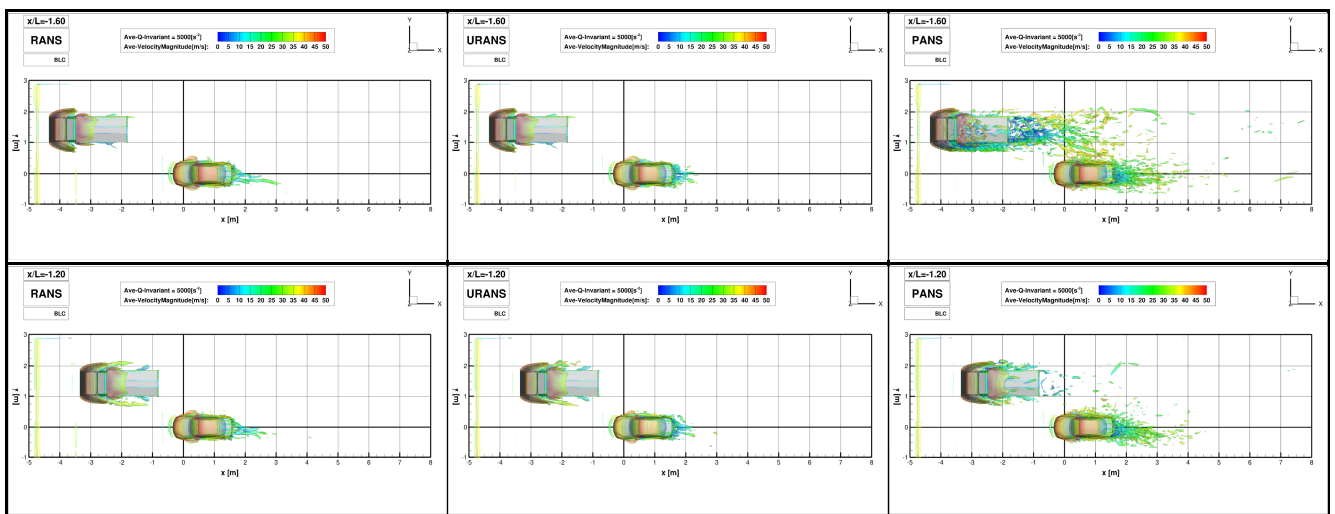


Bild 5.39: Vergleich der Totwässer des PKWs und LKWs bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit *BLC* in allen Positionen der Überholung.

Die oben gezeigten Geschwindigkeitsplots stellen die Strömung nur in einer Ebene dar. Um die Strömung während des Überholvorgangs dreidimensional zu visualisieren wurde auf den Bildern Bild 5.40 und Bild 5.41 wieder die Iso-Fläche des Q -Kriteriums, das das lokale Gleichgewicht zwischen Rotation und Scherung darstellt, mit dem Wert $Q = 5000s^{-2}$ verwendet. Auf dem Bild 5.40 werden die Iso-Flächen des gemittelten Q -Kriteriums mit gemittelter Geschwindigkeit gefärbt angezeigt. Bild 5.41 zeigt dazu eine Momentaufnahme des Q -Kriteriums, das mit augenblicklicher Geschwindigkeit gefüllt ist. Durch die Mittelung des Q -Kriteriums werden nur die am häufigsten auftretenden Wirbelstrukturen rausgefiltert. Bei dieser Darstellung werden zwar weniger Strukturen als bei der Momentaufnahme angezeigt, der Vorteil liegt aber an der Mittelung der periodisch abgelösten Wirbel. Weil sich die Längswirbel an der Fahrzeugoberfläche periodisch ablösen, kann die Momentaufnahme einen falschen Eindruck über die Wechselwirkung zwischen beiden Fahrzeugen hinterlassen. Dabei könnte ein Wirbel aus dem Wirbelpaar schwächer bzw. stärker erscheinen. Durch das gemittelte Q -Kriterium, das auf dem Bild 5.40 abgebildet ist, wird die Wechselwirkung zwischen beiden Nachläufen bei dem Überholvorgang beschrieben. Bei der ersten Position $x/L = -1,60$ ist die Verwirbelung in dem PKW-Nachlauf an der linken Seite intensiver als rechts. Der LKW-Nachlauf wird durch den PKW noch nicht gestört. Danach bei der Position $x/L = -1,20$ bleibt der PKW-Nachlauf weiter mehr nach links geneigt. Der PKW steht neben dem LKW-Nachlauf. Durch die Wirkung des PKW-Staugebietes erhöht sich der Druck in dem LKW-Nachlauf und es entstehen dort somit Wirbel einer Wirbelstärke, die durch diesen Iso-Flächenwert nicht sichtbar sind. Die gleiche Neigung des PKW-Nachlaufs nach links verbleibt auch bei der Position $x/L = -0,80$. Die geringe Verwirbelung in dem LKW-Nachlauf weist auf eine noch verbliebende Wirkung des PKWs hin. Der linke Wirbel, der sich auf dem Fahrerhaus ablöst, schwimmt zwischen beiden Fahrzeugen mit einer erhöhten Geschwindigkeit ab. Das gleiche gilt auch für die Ablösungen an der rechten Vorderseite des PKWs. Bei der Position $x/L = -0,40$ kommt es zu einer Umlenkung des PKW-Nachlaufs. Der rechte Längswirbel ist deutlich stärker ausgeprägt. Der LKW-Nachlauf wird von dem erhöhten Druck aus dem PKW nicht mehr beeinflusst. In dem LKW-Nachlauf erscheinen wieder zahlreiche Wirbelstrukturen. Die Ablösung aus dem Fahrerhaus wird in den PKW-Nachlauf angesaugt. Bei der Position $x/L = 0,00$, bei der der PKW-Nachlauf vor den LKW-Nachlauf kommt, werden die Wirbel aus dem PKW-Nachlauf in den LKW-Nachlauf angesaugt. Der rechte Längswirbel bleibt in dem PKW-Nachlauf weiter dominant. Der LKW-Nachlauf wird von den Wirbeln aus dem PKW-Nachlauf gespeist und entwickelt sich dadurch größer als bei den anderen Positionen. Bei der nächsten Position $x/L = 0,39$ wächst der rechte Längswirbel weiter und überwiegt in dem PKW-Nachlauf. Dieser Längswirbel interagiert mit den linken Fahrerhauswirbeln. Die vorletzte Position $x/L = 0,77$ zeigt ebenfalls ein ähnliches Verhalten. Der dominante Längswirbel wird aus dem PKW-Nachlauf in Richtung des LKWs angesaugt, dissipiert später und die Energie bleibt in ihm länger erhalten. Durch die Wirkung des LKW-Staupunkts wird bei der letzten Position $x/L = 1,17$ die Form des PKW-Nachlaufs erneut verändert. Das Überdruckgebiet, das aus dem LKW kommt, lenkt die Strömung in dem PKW-Nachlauf nach links ab. Die Wirbel aus der linken Seite des LKWs weichen in Richtung des PKW-Nachlaufs ab.



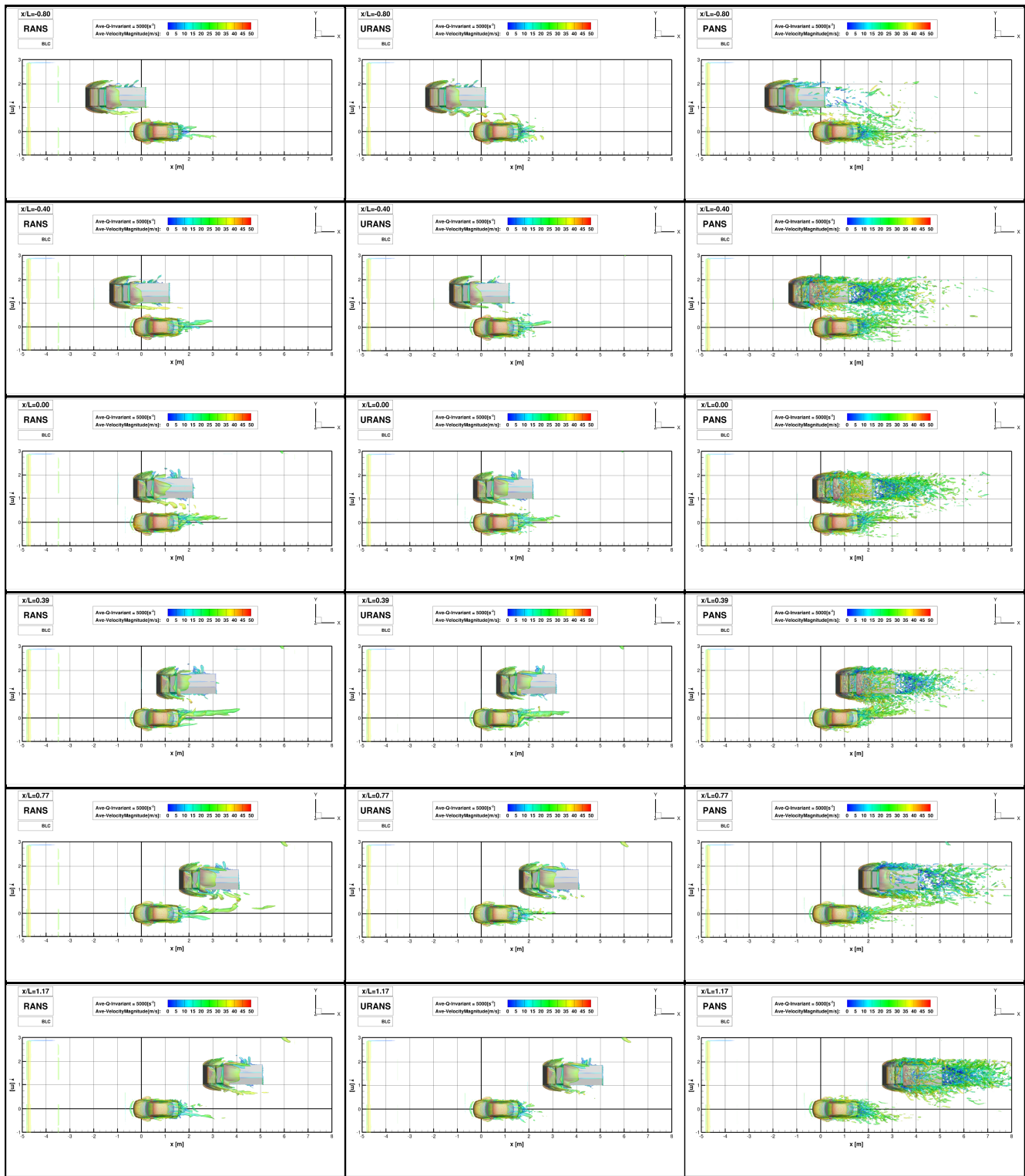
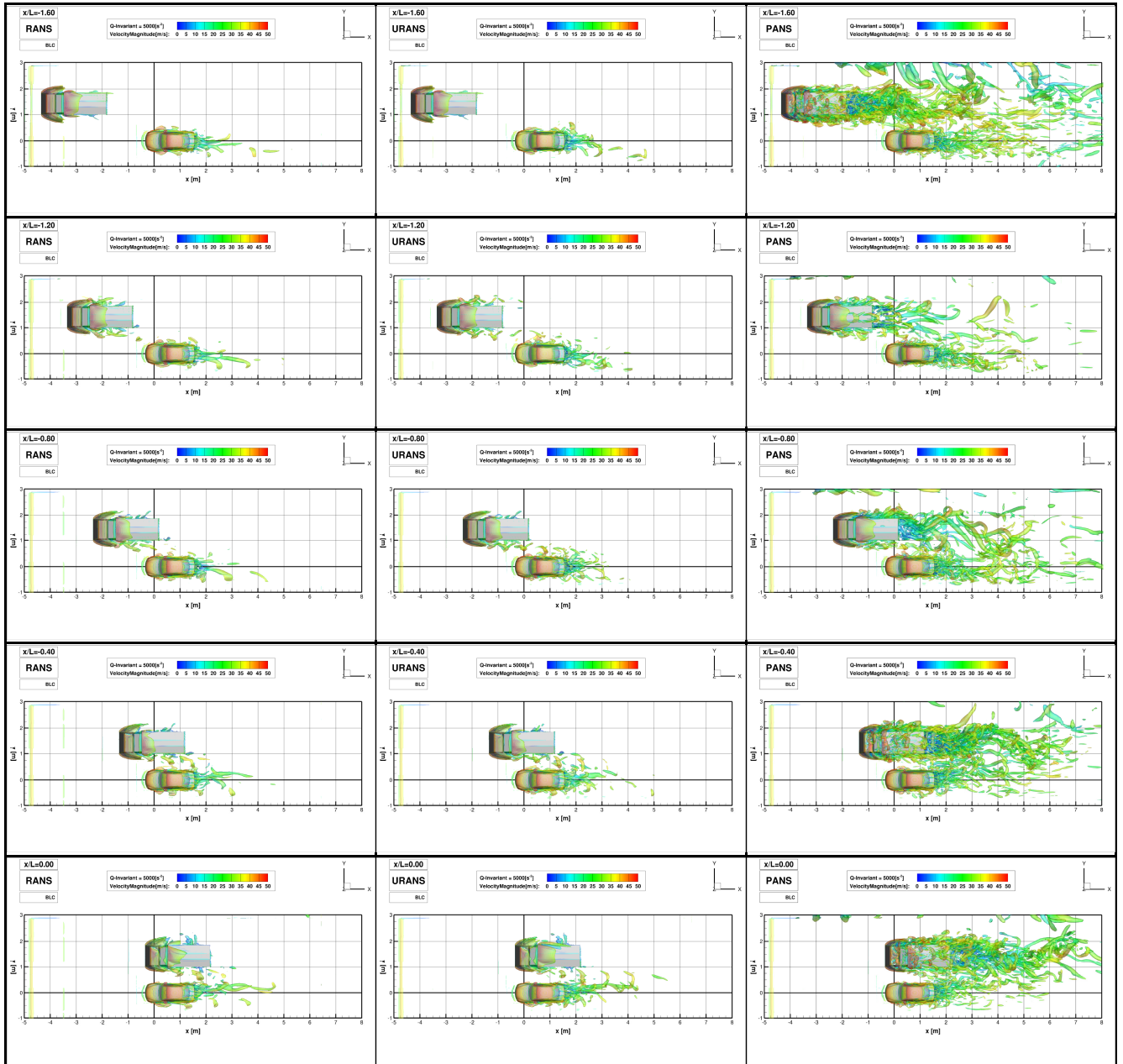


Bild 5.40: Vergleich der Strukturen des gemittelten Q-Kriteriums durch gemittelte Geschwindigkeit gefüllt bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit *BLC* in allen Positionen der Überholung.

Nach der allgemeinen Beschreibung der Strömung während des Überholvorgangs folgt nun eine Beschreibung der einzelnen Wirbel bei den Momentaufnahmen auf dem Bild 5.41. Bei dem PKW lösen sich an den A- und C-Säulen Längswirbel ab, die dann parallel zu ihrer Ablösekante verlaufen. Hinter den Seitenspiegeln entstehen stationäre Wirbeltüten. Zwischen dem C-Säule Wirbelpaar bildet sich auf der Heckscheibe, aus abgelöster Strömung von dem Dach, ein zweites Längswirbelpaar. Bei Umströmung der Räder entstehen viele Verwirbelungen. In Bodennähe bildet sich beim Vorderrad ein Hufeisenwirbel. Der Ringwirbel löst sich periodisch aus dem Totwasser ab und schwimmt als spiralförmiger Wirbel in den Nachlauf ab. Bei der RANS

Simulation sind diese Wirbel in große Längswirbel vereint. Die Periodizität der Ablösungen wird bei URANS deutlich besser wiedergegeben. Die PANS Simulation zeigt an dieser Stelle im Nachlauf viele Feinstrukturen, die mehr der Realität entsprechen. Bei den Überholpositionen $x/L = -0,40$, $x/L = 0,00$ und $x/L = 0,39$, bei denen der PKW neben dem LKW steht, ist die Wirbelentwicklung an der rechten Seite des PKWs unterdrückt. Auf der kantigen Form des LKW's entstehen zahlreiche große Ablösungen. Bei allen Simulationsverfahren entsteht auf dem Fahrerhaus seitlich und auf dem Dach eine große Ablösung. Auf diese Ablösungen folgen Ablösungen auf den Vorderkanten des Aufbaus. Dazu kommen die Ablösungen an den Rädern und im Unterboden. Die Reproduzierung der Wirbelstrukturen im Nachlauf gelingt am besten der PANS Simulation. Durch die direkte Auflösung der Strömung reproduziert PANS auch die Feinstrukturen. Die Modellierung der Strömung bei RANS und URANS verschmelzt die Feinstrukturen in große Wirbel, die außerhalb der gewählten Skala des Q -Kriteriums liegen.



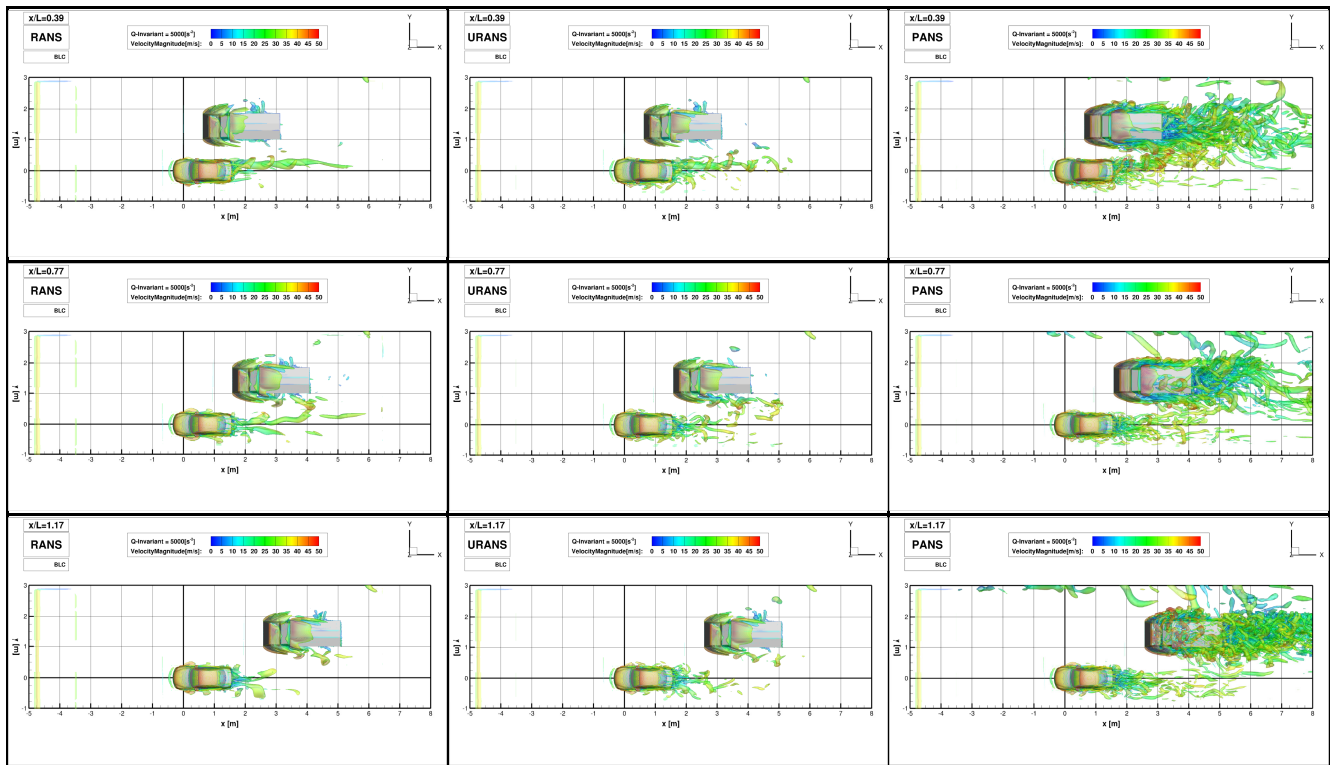
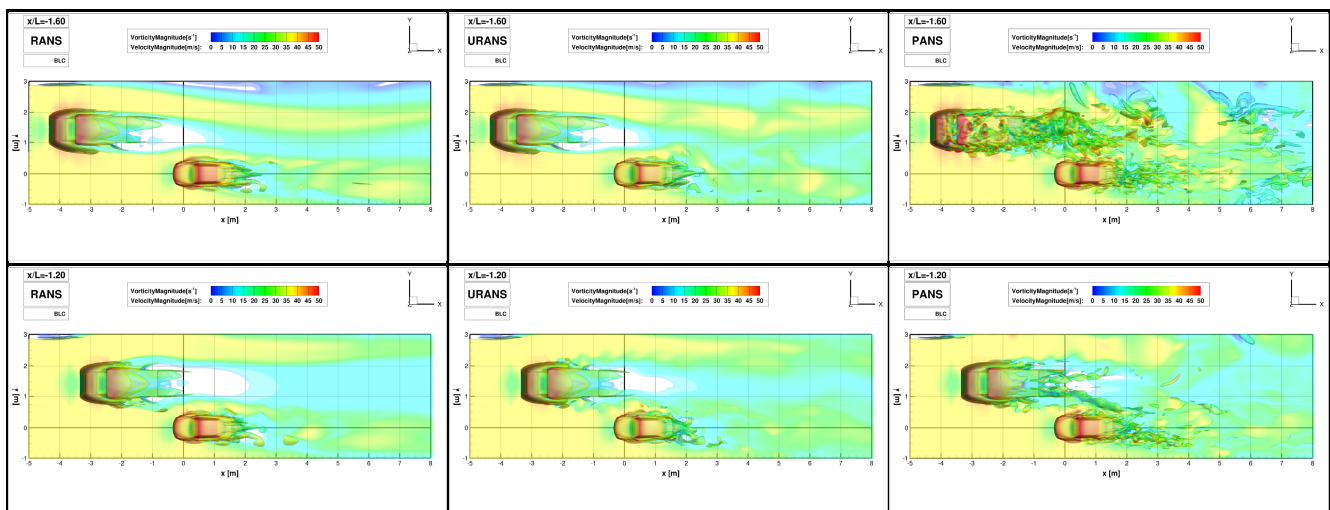


Bild 5.41: Vergleich der Strukturen des augenblicklichen Q-Kriteriums durch augenblickliche Geschwindigkeit gefüllt bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit *BLC* in allen Positionen der Überholung.

Eine weitere Größe, durch die die Wirbelstrukturen identifiziert werden können, stellt die Wirbelstärke dar. Sie beschreibt das Maß der drehenden Bewegung eines Fluides. Auf dem Bild 5.42 werden die Iso-Flächen von den zwei Wirbelstärken $\omega = 300s^{-1}$ und $\omega = 500s^{-1}$ gezeigt. Dabei handelt es sich wieder um eine Momentaufnahme der Wirbelstärke, bei der die Iso-Flächen mit der augenblicklichen Geschwindigkeit gefüllt werden. Auch durch die Wirbelstärke werden die typischen Ablösungen an beiden Fahrzeugen sichtbar. Die Ablenkungen des PKW-Nachlaufs während des Überholvorgangs entsprechen der Beschreibung für das *Q*-Kriterium. Der LKW-Nachlauf wird durch das PKW-Staugebiet an den Positionen $x/L = -1,20$ und $x/L = -0,80$ genauso beeinflusst. Durch RANS und URANS werden in den Nachläufen nur die großen Strukturen gezeigt. Die wirbelauflösende hybride Methode PANS liefert an dieser Stelle Feinstrukturen. Auch die seitliche Umströmung wird durch PANS besser erfasst. Durch die Wirbelstärke werden vor allem die Längswirbel an den A- und C-Säulen und an der Heckscheibe, die Wirbeltüten hinter den Außenspiegeln und die Hufeisenwirbel bei den Vorderädern rausgefiltert. Bei dem LKW sind wieder große Wirbel bei dem Fahrerhaus und an der Vorderkante des Aufbaus sichtbar. Der Nachteil der Wirbelstärke ist, dass sie an der Wand ein Maximum hat. Aus diesem Grund sind die Plots weniger übersichtlich.



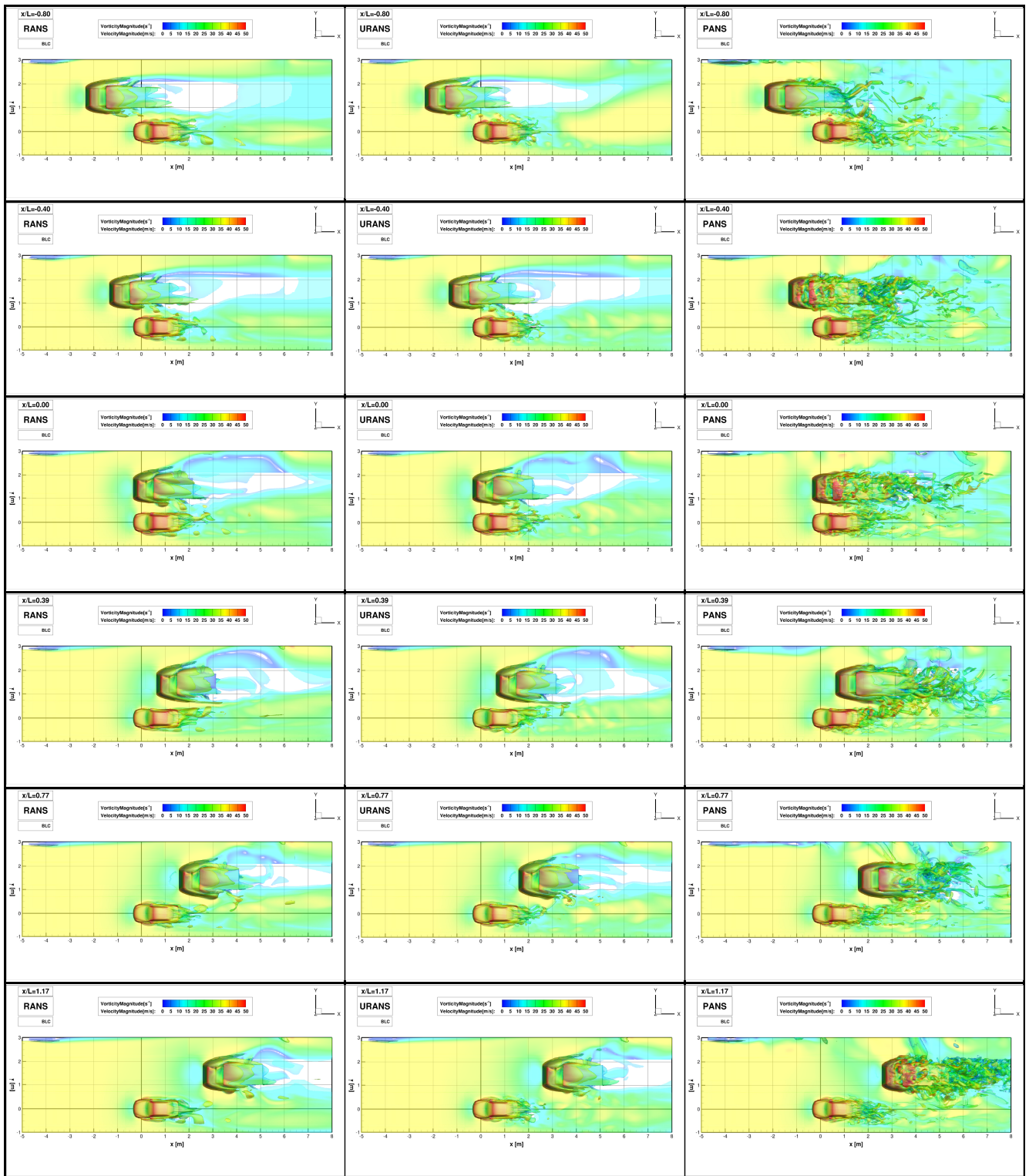


Bild 5.42: Vergleich der Strukturen der augenblicklichen Wirbelstärke durch augenblickliche Geschwindigkeit gefüllt bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit *BLC* in allen Positionen der Überholung.

Zum Schluss werden in diesem Kapitel die relevanten turbulenten Größen und Indikatoren der Gitterqualität präsentiert. Dazu wurde die Überholposition $x/L = 0,39$ mit dem Case *Wheels-BLC*- bei allen drei RANS, URANS und PANS Simulationsverfahren ausgewählt. Mittels der turbulenten kinetischen Energie und der Dissipationsrate wird der Turbulenzgrad beschrieben. Die Berechnungsqualität wird anhand des dimensionslosen Wandabstands y^+ , der CFL-Zahl und des delta/eta-Verhältnisses festgestellt. Bei der PANS Simulation wird zusätzlich noch der f_k -Parameter berücksichtigt.

Die nichtgemittelte turbulente kinetische Energie in der Zentralebene beider Fahrzeuge wird auf dem Bild 5.43a gezeigt. Beim PKW zeigen RANS und URANS eine Erhöhung der turbulenten kinetischen Energie im Totwasser und in dem Nachlauf. Die erhöhten Werte bilden Spuren von Wirbeln, die sich an dem Heckspoiler und auf der Unterbodenkante abgelöst haben. Bei PANS handelt es sich um eine totale turbulente kinetische Energie, die aus einem aufgelösten und einem nichtaufgelösten Anteil besteht. Sie zeigt im Totwasser und im Nachlauf deutlich größere Werte bei einzelnen Wirbelstrukturen. Beim LKW entsteht eine Erhöhung der turbulenten kinetischen Energie durch die Ablösungen am Fahrerhaus, am Luftleitschild und auf dem Aufbau. RANS und URANS zeigen zwei lange kohärente Zonen, die aus dem Dach und aus dem Unterboden kommen und gemeinsam in den Nachlauf abschwimmen. Dadurch bildet sich bei RANS und URANS ein längeres Totwasser. Bei PANS kommt es im Gegensatz dazu zu einer intensiven Vermischung der separierten Scherschicht und der freien Strömung. Dadurch ist das Totwasser kleiner und die totale turbulente Energie größer.

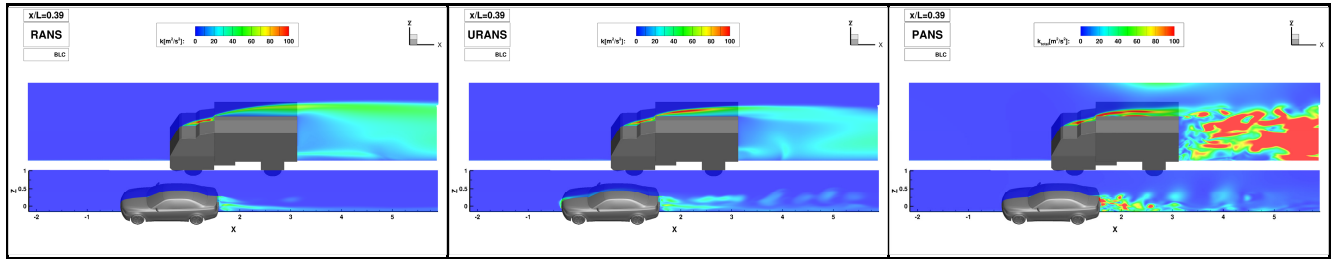


Bild 5.43a: Vergleich der augenblicklichen turbulenten kinetischen Energie im PKW- und LKW-Längsmittelschnitt bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in der Position $x/L = 0,39$.

Die gemittelte totale turbulente Energie bei PANS, die auf dem Bild 5.43b abgebildet ist, zeigt sowohl beim PKW im Totwasser und im Nachlauf als auch beim LKW auf dem Fahrerhaus, dem Luftleitschild, dem Aufbau und im Nachlauf deutlich größere Werte. Bei PANS behalten die energietragenden Wirbelstrukturen ihre Energie länger als bei RANS und URANS. Die turbulente kinetische Energie verhält sich proportional zu der Dissipationsrate. Wenn die Wirbelstrukturen schneller dissipieren, verbleibt ihnen auch weniger Energie. Dies beweist auch das Bild 5.45. Hinter dem PKW im Totwasser und im Nachlauf dissipieren die Wirbelstrukturen bei RANS und URANS intensiver und verlieren somit ihre Energie schneller als bei PANS. Bei PANS beschränkt sich die intensive Dissipation nur auf das Totwasser. Bei dem LKW kommt es bei allen drei Simulationen zu einer starken Dissipation auf dem Fahrerhaus, dem Luftleitschild und auf dem Aufbau. Bei RANS und URANS wird sie weit in den Nachlauf getragen; bei PANS beschränkt sie sich auf die Fahrzeugoberfläche. Durch eine intensive Dissipation wird die Strömung aus dem Unterboden bei RANS und URANS geschwächt. Dadurch kommt es nicht wie bei PANS zu einer schärferen Biegung der Strömung am Heck; das Totwasser verlängert sich. Durch die niedrige Dissipation auf dem Unterboden bei PANS entsteht die richtige Form des Totwassers. Im Nachlauf entstehen und zerfallen gleichzeitig bei PANS viele feinere Wirbelstrukturen.

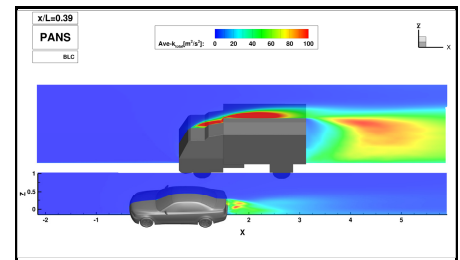


Bild 5.43b: Gemittelte turbulente kinetische Energie im PKW- und LKW-Längsmittelschnitt bei PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in der Position $x/L = 0,39$.

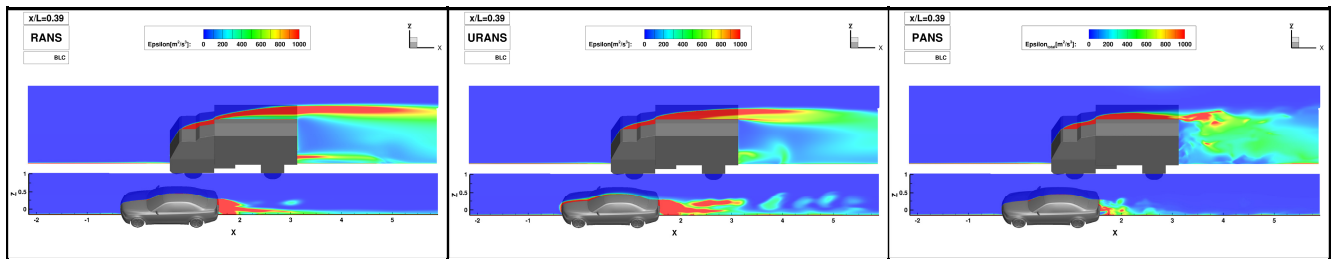


Bild 5.45: Vergleich der augenblicklichen Dissipationsrate im PKW- und LKW-Längsmittelschnitt bei RANS, URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in der Position $x/L = 0,39$.

Für die PANS Simulation werden zwei Formulierungen des Parameters f_k dargestellt und miteinander verglichen. Die erste Formulierung wird während der Berechnung benutzt und ist von der Gittergröße abhängig. f_k ist in diesem Fall das Verhältnis zwischen der Gittergröße und der Längenskala. Die Längenskala

stellt die Beziehung zwischen der gesamten turbulenten kinetischen Energie und der nichtaufgelösten Dissipationsrate dar:

$$f_k \geq \frac{1}{\sqrt{C_\mu}} \left(\frac{\Delta}{\Lambda} \right)^{2/3}, \quad \Lambda = \frac{k_{tot}^{3/2}}{\varepsilon_u} \quad (5.1)$$

Der f_k Parameter ist ein dynamischer Parameter, der in Zeit und Ort fließend einen Wert zwischen: $0 \leq f_k \leq 1$ annehmen kann. Dadurch wird festgestellt zu welchem Teil die Strömung aufgelöst oder simuliert wird.

Die zweite Formulierung definiert den f_k Parameter als das Verhältnis der nichtaufgelösten zu der totalen turbulenten kinetischen Energie:

$$f_k = \frac{k_u}{k_{tot}} \quad (5.2)$$

Bei $f_k = 1$ wird die Strömung komplett modelliert (RANS Modus). Im Gegensatz dazu wird bei $f_k = 0$ die Strömung wie bei DNS direkt aufgelöst. Die beiden Definitionen des f_k Parameters zeigt das Bild 5.46. Während für eine komplette Übersicht die ganze PKW-Zentralebene $y = 0m$ dargestellt wurde, wurde zur näheren Untersuchung der Nachläufe auf die Zentralebenen $y = 0m$ und $y = 1,432m$ beider Fahrzeuge fokussiert. In der ersten Zeile ist der gitterabhängige f_k Parameter dargestellt. So wurde zum Zeitpunkt $t = 20,6s$ f_k aus der Formulierung durch das Modell berechnet. In der Düse ist die Gittergröße größer als die Initialwerte von $k = 0,0001m^2s^{-2}$ und $\varepsilon = 0,0005m^2s^{-3}$ in der Einlassebene; die Strömung wird zum größten Teil komplett modelliert. Ebenso an Stellen mit starker Dissipation, wie z.B. in der separierten Scherschicht der beiden Fahrzeuge, zum Teil im Totwasser und an Stellen mit kleiner turbulenter kinetischer Energie, wie z.B. in der

Grenzschicht vor den Fahrzeugen, nimmt der f_k Parameter höhere Werte an. Im Gegensatz dazu führt eine starke turbulente kinetische Energie bzw. eine kleine Dissipation zu einem niedrigen f_k . Solche Stellen sind vor allem im Totwasser und im Nachlauf sichtbar. Auf den Abbildungen in der zweiten Zeile ist f_k aus der Formulierung k_u durch k_{tot} dargestellt. Der f_k Parameter aus dem Verhältnis der nichtaufgelösten zur totalen turbulenten kinetischen Energie weist tendenziell kleinere Werte auf als der gitterabhängige f_k Parameter. Das heißt, dass das durch das Modell vorhergesagte f_k durch das Gitter unterstützt wird.

Auf der dritten und vierten Zeile wird das gleiche Verhältnis zeitlich gemittelt abgebildet. Der gitterabhängige f_k Parameter verhält sich ähnlich wie es oben bei der Momentaufnahme beschrieben wurde. Die Mittelung des f_k als k_u durch k_{tot} zeigt höhere f_k -Werte vor und oberhalb der Fahrzeuge, also an Stellen an denen die turbulente kinetische Energie relativ niedrig ist. Die Strömung in

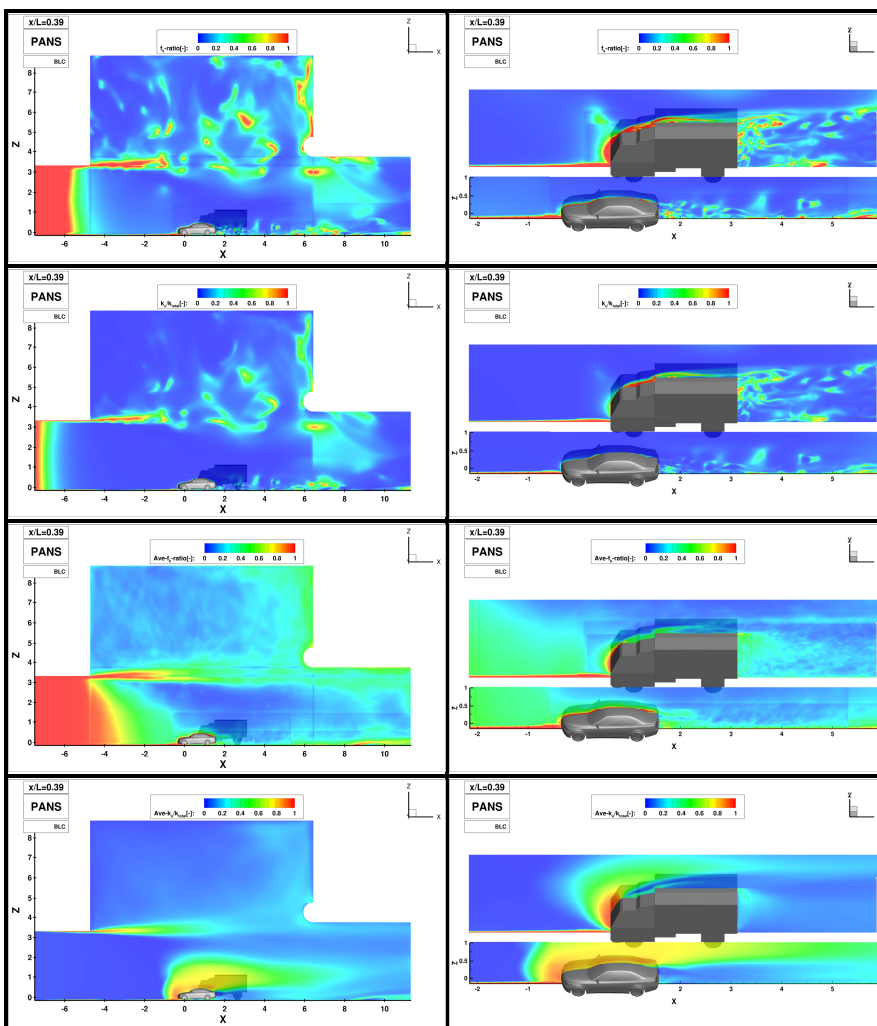


Bild 5.46: Vergleich des f_k Parameters mit dem Verhältnis k_u durch k_{tot} in der Fahrzeugnähe und in gesamter Domäne beim PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in der Position $x/L = 0,39$.

den Totwassergebieten und Nachläufen wird weiterhin aufgelöst und nicht modelliert.

Die Gitterqualität auf beiden Fahrzeugoberflächen wird anhand des dimensionslosen Wandabstands y^+ betrachtet. Die Höchstwerte entstehen an Stellen mit höherer Geschwindigkeit und größeren Zellen (siehe Definition: $y^+ = \frac{\rho \bar{u}_\tau y}{\mu}$). Auf dem Bild 5.47 sind die PKW- und LKW-Oberflächen bei allen drei Simulationsverfahren dargestellt. Bei der PKW-Oberfläche erreichen die Maximalwerte auf dem Dach, an den Reifen und an Teilen des Unterbodens ein $y^+ \approx 20$. Bei der LKW-Oberfläche sind das vor allem der Unterboden, der Aufbau und das Dach des Fahrerhauses wo die Werte ein $y^+ \approx 30$ erreichen. Damit liegt bei beiden Werten der erste wandnahe Zellmittelpunkt in der Übergangsschicht. Der erste Zellmittelpunkt befindet sich ebenso in der Übergangsschicht bei beiden Fahrzeugoberflächen, wo überwiegend das $y^+ \approx 10$ herrscht. An Stellen, an denen das Gitter sehr fein und das $y^+ < 5$ ist, liegt der erste Zellmittelpunkt in der viskosen Unterschicht. Die hier verwendete hybride Wandfunktion integriert bis zur Wand in der viskosen Unterschicht und verwendet die Standardwandfunktion in dem logarithmischen Bereich. In der Übergangsschicht blendet dann eine exponentielle Blendingfunktion zwischen der viskosen Unterschicht und dem logarithmischen Bereich. Durch die Unterschiede in der Darstellung der Strömung zwischen den RANS, URANS und PANS Simulationen, kommt es auch zu Abweichungen bei dem dimensionslosen Wandabstand y^+ .

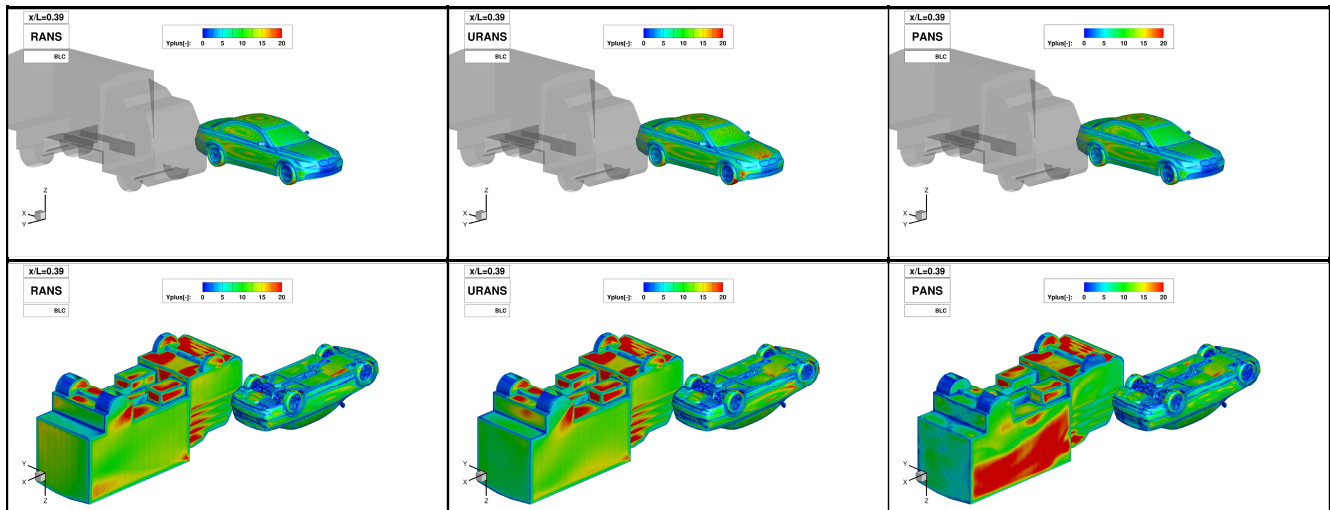


Bild 5.47: Vergleich des y^+ -Wertes auf der PKW- und LKW-Oberfläche beim PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit BLC in der Position $x/L = 0,39$.

Das nächste Kriterium stellt die Gitterqualität räumlich fest. Es handelt sich um die CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) Zahl. Nach ihrer Definition $CFL = \frac{u \Delta t}{\Delta x}$ besagt sie, wie schnell sich ein Teilchen innerhalb eines Zeitschrittes in dem numerischen Gitter bewegt. Wenn der Wert $CFL < 1$ ist, bewegt sich das Teilchen zwischen zwei Zeitschritten innerhalb einer Zelle. Bei $CFL > 1$ überspringt es in zwei Zeitschritten mehrere Zellen. Für die Betrachtung der Hauptströmung wurde die ganze PKW-Zentralebene $y = 0m$ ausgewählt, die auf dem Bild 5.48 dargestellt ist.

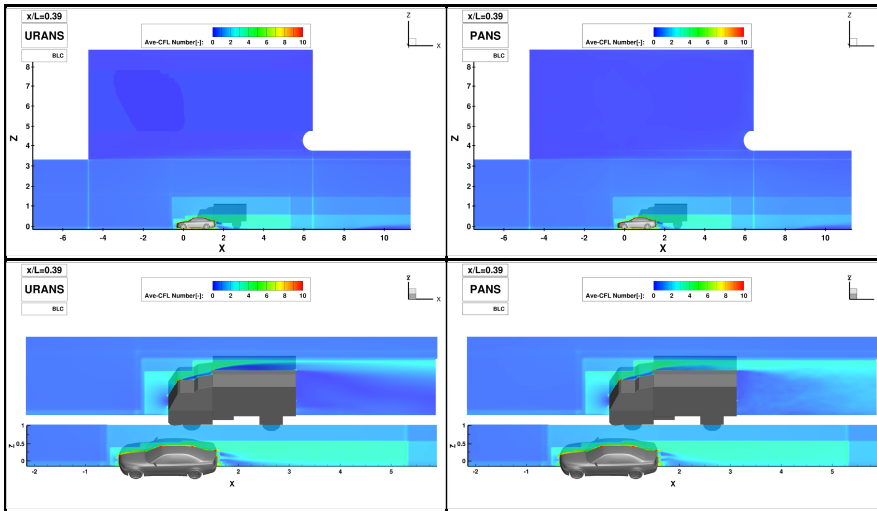


Bild 5.48: CFL-Zahl in der Fahrzeugnähe und in gesamter Domäne bei URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit *BLC* in der Position $x/L = 0,39$.

Zahl auf $CFL \approx 20$. In der Nähe der LKW-Oberfläche außerhalb der Ablösungen, wo die Strömung angelegt ist, erreicht $CFL \approx 5$. An den fein vernetzten Kanten des Fahrerhauses, des Luftleitschilds und des Aufbaus, wo es ebenso zu einer Beschleunigung der Strömung kommt, steigt die CFL-Zahl auf $CFL \approx 15$. Obwohl die hier verwendete implizite Zeitdiskretisierung auch Werte von $CFL > 1$ erlaubt, bleibt die Hauptströmung überwiegend unter $CFL = 1$. Die erhöhten Werte der CFL-Zahl in der *FAMEHexa* Domäne und in der Fahrzeugnähe beeinträchtigen die Stabilität der Berechnung nicht.

Als letzter Indikator der Gitterqualität dient die δ/η Kennzahl. Die δ/η Kennzahl stellt nach der Formulierung $\frac{\delta}{\eta} = \frac{(\Delta_{vol})^{1/3}}{(v^3/\varepsilon)^{1/4}}$ fest, welche Wirbelstrukturen im Vergleich zu den kleinsten Wirbelstrukturen (Kolmogorov-Längenskala) durch das Gitter aufgelöst werden können. Bei LES sollte der Wert von δ/η unter $\frac{\delta}{\eta} < 30$ liegen.

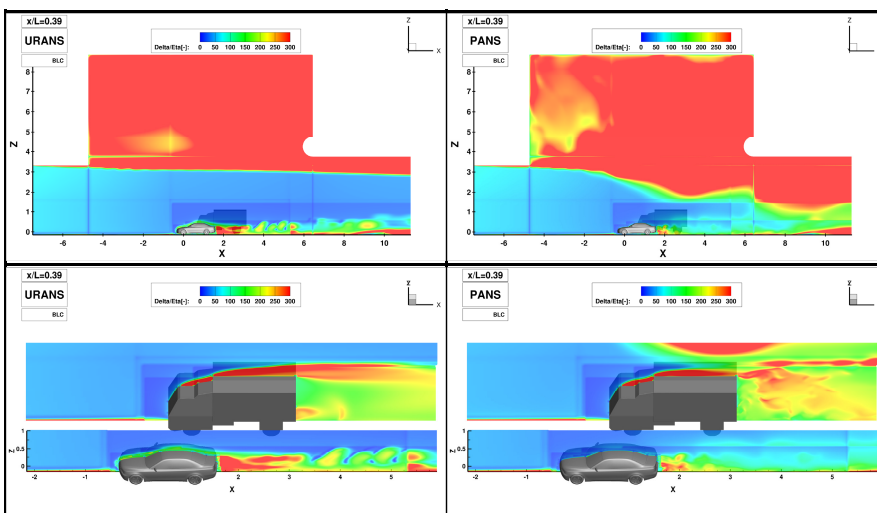


Bild 5.49: δ/η Kennzahl in der Fahrzeugnähe und in gesamter Domäne bei URANS, PANS Verfahren im Windkanalnachbau mit *BLC* in der Position $x/L = 0,39$.

Fahrzeugnähe ist die *FAME Hexa* Domäne fein vernetzt. Eine höhere Dissipationsrate führt zu Erhöhung der δ/η Kennzahl; ein feines Gitter senkt sie wieder. So erreicht die δ/η Kennzahl im Totwasser hinter dem PKW Maximalwerte von $\frac{\delta}{\eta} = 250$. In dem PKW-Nachlauf beläuft sich der Maximalwert auf $\frac{\delta}{\eta} \approx 200$ und

In der Düse, im Plenum und im Kollektor liegt die $CFL < 1$. In der *FAMEHexa* Domäne und in dem Nachlauf variiert die CFL-Zahl zwischen $CFL = 1,5 \div 3$. Für die Betrachtung des feinen Gitters in Fahrzeugnähe wurden die Zentralebenen von beiden Fahrzeugen $y = 0m$ und $y = 1,432m$ genommen. In der Nähe der PKW-Oberfläche erreicht die CFL-Zahl einen Wert von $CFL \approx 6$. In Bereichen der fein vernetzten Kanten und Krümmungen auf der Motorhaube, dem Dach, dem Heckspoiler und auf dem Frontdiffusor, wo sehr feine Zellen vorhanden sind und die Strömung beschleunigt wird, steigt die CFL-

Auf der PKW-Zentralebene $y = 0m$, die auf dem Bild 5.49 zuerst gezeigt wird, sind die Werte der δ/η dank kleiner Dissipation in der Hauptströmung in der Düse, im Plenum und im Kollektor relativ niedrig und erreichen Werte von $\frac{\delta}{\eta} = 50$. Im oberen Teil des Plenums und des Kollektors steigt die Dissipationsrate und zusätzlich wird das Gitter gröber. Dort steigt die δ/η Kennzahl auf $\frac{\delta}{\eta} \approx 500$.

In den Zentralebenen beider Fahrzeuge erreicht die Dissipationsrate ihr Maximum im Totwasser, im Nachlauf und oberhalb des Fahrzeuges. In

weit hinten im Nachlauf, hinter der *FAME Hexa* Domäne erreicht er ein Maximum von $\frac{\delta}{\eta} \approx 150$. Das heißt, dass in dem PKW-Nachlauf durch das Gitter ungefähr 200fach größere Wirbelstrukturen als die kleinsten aufgenommen werden können. Beim LKW erreicht die *delta/eta* Kennzahl, dank der starken Verwirbelungen auf dem Fahrerhaus, dem Luftleitschild und auf dem Aufbau und eine dadurch erhöhte Dissipationsrate, Maximalwerte von $\frac{\delta}{\eta} \approx 400$.

5.2.2. Computertechnische Auswertung

Die in diesem Kapitel durchgeführten Berechnungen wurden wie die Berechnungen aus dem vorherigen Kapitel 4 Umströmung eines realistischen Fahrzeuges (*RealCar*) ebenso an dem Hochleistungsrechner *Fuchs* des Center for Scientific Computing (CSC) an der Johann Wolfgang Goethe-Universität Frankfurt am Main und an dem *Lichtenberg-Hochleistungsrechner (ICluster)* des Hochschulrechenzentrums der Technischen Universität Darmstadt durchgeführt. Zusätzlich wurde auch der Hochleistungsrechner *moabmaster* des Fachgebietes Mathematische Modellierung und Analyse der Technischen Universität Darmstadt verwendet. Die Hardwarespezifikationen der hier verwendeten Hochleistungsrechner können aus der Tabelle 4.8 entnommen werden. Der Hochleistungsrechner *moabmaster* ist sowohl mit *Intel* als auch mit *AMD* Prozessoren ausgestattet. Bei dem *Intel Xeon E5472* handelt es sich um einen Prozessor der *Harpertown* Mikroarchitektur mit 4 Kernen, der Teil eines *Dual CPU* Aufbaus ist. Der Prozessor *AMD Opteron 6136* bildet eine *Quad CPU* Architektur und besteht aus 8 Kernen. Die *Intel* Prozessoren bilden Rechenknoten mit je 8 Prozessorkernen; die *AMD* Rechenknoten bestehen aus 32 Prozessorkernen. Der *Job Scheduler* beim *moabmaster* ist das *Batch System Moab*. Alle in diesem Kapitel berechneten Simulationen sind in der Tabelle 5.11 aufgelistet. Dort sind zu jeder Berechnung die Prozessoranzahl, bei RANS die Anzahl von Iterationen, bei URANS und PANS die Anzahl der *Time Steps* einschließlich der Iterationsanzahl innerhalb eines *Time Steps* und die gesamte Rechenzeit angegeben. Die Rechenzeit ist dann auf die Zeitdauer einer Iteration bzw. eines *Time Steps* und auf die CPU-Stunden skaliert. Damit durch die CPU-Stunden unterschiedlich lange Simulationen miteinander verglichen werden können, werden die CPU-Stunden auf 10000 Iterationen bzw. *Time Steps* bezogen. Sie sind auf dem Bild 5.50 links aufgetragen.

Tabelle 5.11: Liste von im Kapitel 5 Quasi-stationärer PKW-LKW Überholvorgang (*RealCar and Truck*) durchgeführten Simulationen mit verwendeten Ressourcen und ihrem Rechenaufwand.

Calculation	Case	Architecture	Cluster	CPUs	IT/TS	IT in TS	Sum [tt hh:mm:ss]	1 IT/TS / [s]	CPU-Hours	CPU-H 10k	
1.17	Wheels-BLC-	RANS	Six-Core AMD Opteron(tm) Processor 2	CSC	128	80659	1	38 20:04:31	42	119306	14791
		URANS	Six-Core AMD Opteron(tm) Processor 2	CSC	128	10300	10	48 07:38:24	405	148434	144111
		PANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	128	10300	15	22 22:51:02	193	70509	68455
0.77	Wheels-BLC-	RANS	Six-Core AMD Opteron(tm) Processor 2	CSC	128	80045	1	40 15:44:46	44	124896	15603
		URANS	Six-Core AMD Opteron(tm) Processor 2	CSC	128	10300	10	54 20:42:21	460	168538	163629
		PANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	128	10300	15	22 13:32:11	189	69317	67298
0.39	Wheels-BLC-	RANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	128	80000	1	11 08:05:47	12	34828	4354
		URANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	128	20600	10	27 22:34:01	117	85833	41666
		PANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	128	20600	15	42 10:09:31	178	130324	63264
0.00	Wheels-BLC-	RANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5472	moabmaster	64	81590	1	51 04:07:43	54	78600	9634
		URANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	128	10300	10	15 09:47:13	129	47333	45954
		PANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	128	10300	15	22 15:52:02	190	69615	67587
-0.40	Wheels-BLC-	RANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	128	82755	1	14 18:15:27	15	45345	5479
		URANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	128	10300	10	16 15:04:57	139	51083	49595
		PANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	128	10300	15	23 20:58:45	200	73341	71205
-0.80	Wheels-BLC-	RANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	128	85514	1	14 15:07:45	15	44945	5256
		URANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	128	10300	10	15 18:15:50	132	48418	47008
		PANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	128	10300	15	23 21:56:30	201	73465	71325
-1.20	Wheels-BLC-	RANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	128	82468	1	12 22:51:42	14	39790	4825
		URANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	128	10300	10	14 23:33:55	126	46024	44684
		PANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	128	10300	15	22 13:09:57	189	69269	67252
-1.60	Wheels-BLC-	RANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	128	81695	1	13 06:03:26	14	40711	4983
		URANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	128	10300	10	16 13:18:59	139	50857	49375
		PANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	128	10300	15	24 05:26:00	203	74423	72256
0.39	Wheels_IO-	RANS	AMD Opteron(tm) Processor 6136	moabmaster	32	50000	1	58 22:09:40	102	45253	9051
		URANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5472	moabmaster	32	2952	10	32 09:48:53	923	24890	84316
		URANS	AMD Opteron(tm) Processor 6136	moabmaster	32	1550	10	17 03:59:42	877	13184	85057
0.39	Wheels-	RANS	Six-Core AMD Opteron(tm) Processor 2	CSC	32	3475	10	41 02:34:27	965	31570	90850
		URANS	Six-Core AMD Opteron(tm) Processor 2	CSC	64	10300	10	62 07:53:50	523	95737	92949
		PANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	128	180308	1	27 03:58:24	13	83453	4628
0.39	Wheels-	URANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	128	10815	10	14 23:03:12	120	45959	42495
		PANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	128	10417	15	21 23:09:11	182	67476	64775
		URANS	Six-Core AMD Opteron(tm) Processor 2	CSC	32	50000	1	76 19:25:25	133	58990	11798

Der Graf auf dem Bild 5.50 links stellt einen Vergleich zwischen den Hochleistungsrechnern und den Simulationsverfahren dar. Bei der URANS Simulation wurde der gleiche Case *Wheels_IO-URANS* und die gleiche Prozessoranzahl von 32 CPU für die Berechnungen auf dem *moabmaster* und dem *CSC Cluster* verwendet. Der *ICluster* ist durch eine höhere Zellenanzahl des Case *Wheels-BLC-URANS* und eine höhere Prozessoranzahl

von 128 CPU bei diesem Vergleich leicht benachteiligt. Bei dem direkten Vergleich zwischen den *Intel Xeon E5472* und den *AMD Opteron 6136* Prozessoren des Hochleistungsrechners *moabmaster* zeigt sich, dass die 4-Kern *Intel* Prozessoren nur um ein Prozent schneller als die 8-Kern *AMD* Prozessoren sind. Aus einem weiteren direkten Vergleich der *AMD* Prozessoren *AMD Opteron 6136* vom *moabmaster* mit den *AMD Opteron 2XXX* Prozessoren des *CSC Clusters* folgt, dass die 6-Kernprozessoren des *CSC Clusters* um sechs Prozent langsamer als die 8-Kernprozessoren vom *moabmaster* sind. Bei dem indirekten Vergleich sind die 8-Kern *Intel Xeon E5-2670* Prozessoren des *IClusters* trotzdem um 46% schneller als die 4-Kern *Intel* Prozessoren vom *moabmaster*. Bei den RANS Simulationen wurde der Case *Wheels-BLC-RANS* auf 64 *Intel* CPU des *moabmaster* berechnet. Durch das kleinere Gitter des Cases *Wheels_IO-RANS* und die niedrigere Prozessoranzahl 32 CPU war die Berechnung auf den *AMD* Prozessoren des *moabmaster* um sechs Prozent schneller, was aber dem Trend aus dem direkten Vergleich nicht entspricht. Die RANS Simulation *Wheels-BLC-RANS* ist wiederum auf dem *CSC Cluster* langsamer als auf dem *moabmaster*. Einen direkten Vergleich bietet die RANS Simulation im Fall des Case *Wheels-BLC-RANS*, der auf dem *CSC Cluster* und auf dem *ICluster* mit gleicher Prozessoranzahl 128 CPU berechnet wurde. Dabei sind die *Intel* Prozessoren des *IClusters* um 71% schneller als die *AMD* Prozessoren des *CSC Clusters*. Der Mehraufwand des PANS Verfahrens zu URANS, wobei bei PANS zusätzlich zu Reynoldsschen Gleichungen, der Kontinuitätsgleichung, der $k - \epsilon - \zeta -$ und $f -$ Gleichung noch der f_k Parameter berechnet und die Geschwindigkeitskomponenten online gemittelt werden, kann aus den *Wheels_IO*-Simulationen auf dem *CSC Cluster*, die jeweils mit 10 Iterationen pro *Time Step* berechnet wurden, entnommen werden. Im Vergleich zum Kapitel 4 Umströmung eines realistischen Fahrzeuges (*RealCar*), bei dem dieser Mehraufwand acht Prozent betrug, beträgt er jetzt nur zwei Prozent. Diese Senkung wurde aber nur durch einen Zufall verursacht und wird nicht als relevant betrachtet. Auf dem *ICluster* wurden die RANS, URANS und PANS Verfahren mit jeweils 128 CPU berechnet. Die Instationarität des RANS Verfahrens mit 10 Iterationen pro *Time Step* kostet fast eine Verzehnfachung des Rechenaufwands. Der Mehraufwand zum Lösen des PANS Verfahrens und die Erhöhung der Iterationen innerhalb eines *Time Steps* auf 15 erhöht den Rechenaufwand um 34%.

Als Nächstes wird anhand der Kalkulation *RealCar_n_Truck_pos039-Calculation2* und des Cases *Wheels-BLC-PANS* der *Speedup* des *AVL Fire* Programs auf dem *ICluster* analysiert. Das Amdahlsche Gesetz besagt wie die Rechengeschwindigkeit eines Mehrkernprozessors vom Anteil des Programm-Codes, der parallel ausgeführt werden kann, abhängt. Bei einem idealen *Speedup* mit steigender Prozessoranzahl sinkt die Ausführungszeit linear. Bei einer realen Anwendung ist die Skalierbarkeit immer begrenzt. In dem Programm *AVL Fire* ist die Parallelisierung durch eine eigene MPI-Applikation realisiert. Auf dem Bild 5.50 rechts zeigt der Graf eine ideale Skalierbarkeit und die von *AVL Fire* bei Verwendung von 16, 32, 64, 128, 256, 512 und 1024 CPUs. Wegen der RAM-Anforderung bezieht sich der *Speedup* auf 16 Prozessoren (Kerne).

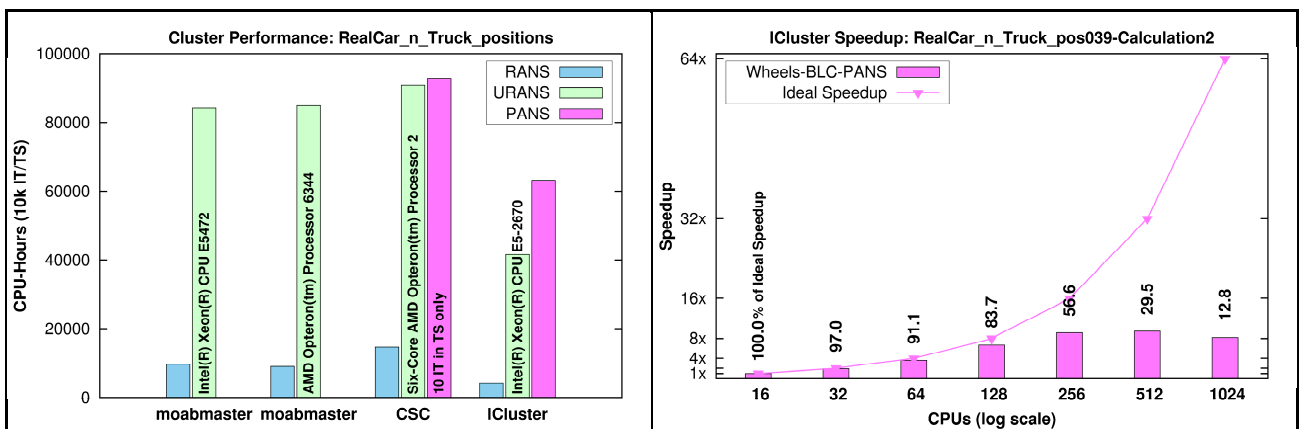


Bild 5.50: Vergleich des Rechenaufwands in Prozessorstunden bei RANS, URANS, PANS Verfahren auf verwendeten Hochleistungsrechnern (links) und Speedup einer *RealCar_n_Truck* Berechnung auf dem *ICluster* (rechts).

Im Vergleich zur Kalkulation aus Kapitel 4 Umströmung eines realistischen Fahrzeuges (*RealCar*) mit zirka 32 Millionen Zellen ermöglicht diese Kalkulation mit etwa 46 Millionen Zellen am Anfang der Skalierung eine bessere Parallelisierung. Ab der 128-CPU Berechnung sinkt der erreichte *Speedup* dramatisch. Die Ursache stellen die großen Interfaceflächen *interface_CAR* und *interface_TRUCK* dar, die bei der Version *AVL Fire v2011.1* nur durch ein *single thread* berechnet werden (diese Einschränkung wurde später bei der Version *AVL Fire v2017* behoben). Bei dieser Kalkulation mit großen Interfaceflächen liegt das Optimum zwischen

Rechendauer und Rechenleistung bei einer 128-CPU Berechnung. Mit dieser Prozessoranzahl wurden auch die meisten Kalkulationen aus diesem Kapitel berechnet.

Zum Schluss werden die bekannten Anforderungen an den Arbeitsspeicher aus dem *AVL Fire GUI* erwähnt. Für die Manipulation mit dem 46 Millionen Zellen Gitter werden 12,2GB RAM und für die Darstellung der *3D Results* 25,6GB RAM benötigt.

6. Dynamischer PKW-LKW Überholvorgang (*RealCar and Truck – Passing*)

In diesem Kapitel wird ebenfalls ein Überholvorgang untersucht. Im Vergleich zum Kapitel 5 Quasi-stationärer PKW-LKW Überholvorgang (*RealCar and Truck*), bei dem die Überholung durch acht diskrete Überholpositionen abgebildet wurde, wird in diesem Kapitel die Geschwindigkeitsdifferenz, die Bewegung und damit eine dynamische Wirkung des Überholens reproduziert. Für die Simulationen wurde für den PKW das vereinfachte Modell des BMW 5er-Reihe E60: *RealCar* und für den LKW das vereinfachte LKW-Modell mit abgekürzter Länge $l = 2,5m$ aus dem Kapitel 5 Quasi-stationärer PKW-LKW Überholvorgang (*RealCar and Truck*) in dem gleichen Modellmaßstab 1:2,5 übernommen. Der Vergleich mit dem Experiment beruft sich auf eine Straßenmessung mit realen Fahrzeugen im Maßstab 1:1, die von Schrefl (Schrefl 2008) durchgeführt wurde. Bei dieser Straßenmessung wurde als PKW der BMW 5er-Reihe E60 und als LKW der MAN L2000 benutzt. Der LKW fährt mit einer Geschwindigkeit von 80 km/h und wird durch den PKW, der eine Geschwindigkeit von 160 km/h hat, überholt. Bei unterschiedlichem Maßstab der untersuchten Fahrzeuge wurde bei den Simulationen die Reynoldssche Ähnlichkeit berücksichtigt. Im Gegensatz zum Kapitel 5 Quasi-stationärer PKW-LKW Überholvorgang (*RealCar and Truck*) ist die Position des LKWs gegenüber dem PKW fixiert. Der Ursprung des Koordinationssystems befindet sich in der Mitte der PKW-Vorderachse bei der Position $x/L = 0,0$. Der Abstand zwischen den beiden Fahrzeugmodellen ist unverändert und konstant geblieben.

Die die dynamische Überholung mit bewegenden Fahrzeugen betreffenden Simulationen werden als *Manoeuvre*-bezeichnet. Für die Generierung der Anfangs-Strömungsfelder wurden zuerst die der Anfangsanordnung beider Fahrzeuge entsprechenden Vorbereitungssimulationen, die als *Beginning*- bezeichnet werden, durchgeführt. Bei den Simulationen *Beginning*- und *Manoeuvre*- werden zwei Darstellungsmöglichkeiten verfolgt, die als *slip* und *move* bezeichnet sind. Bei der *slip* Variante wird die Bewegung des LKWs durch die Anströmung der Luft nachgestellt.

Nach dem dynamischen Ähnlichkeitskonzept in Bezug auf die Reynoldszahl-Konsistenz beträgt die Einlassgeschwindigkeit $U_\infty = 55,555\text{ ms}^{-1}$. Die Geschwindigkeitsdifferenz, mit der sich der PKW gegenüber dem LKW bewegt, wird durch die Bewegung der *CAR_moving* Zone kompensiert. Sie bewegt sich gegen der Strömung mit einer Geschwindigkeit von $u = -55,555\text{ ms}^{-1}$. Die zweite Variante *move* erzeugt die Umströmung nur durch die Gitterbewegung. Es gibt in der Rechendomäne keine Anströmung, die Einlassgeschwindigkeit beträgt daher $U_\infty = 0\text{ ms}^{-1}$. Bei dem Überholvorgang der Variante *Manoeuvre-move* bewegt sich die komplette Rechendomäne mit der Geschwindigkeit des LKWs von $u = 55,555\text{ ms}^{-1}$ und dazu die *CAR_moving* Zone mit der Geschwindigkeit des PKWs von $u = 111,11\text{ ms}^{-1}$. Bei den *Beginning*-Simulationen der beiden Varianten *slip* und *move* ist die Bewegung der *CAR_moving* Zone ausgeschaltet und der PKW an der Position $x/L = -6$ fixiert. An der Auslassebene wurde der Nullgradient aller Variablen definiert. An allen restlichen Rändern der rechteckigen Domäne (Seiten und Top), die hier ausschließlich verwendet wird, wurden symmetrische Randbedingungen adoptiert. Weil die Simulationen eine Überholung auf der Straße nachstellen sollen, wurden zwei Tatsachen berücksichtigt. Bei den *slip* Fällen wird auf der Fahrbahn eine fest gebundene Geschwindigkeit $u = 55,555\text{ ms}^{-1}$ eingesetzt. Diese Darstellung, wenn sich die Fahrbahn mit gleicher Geschwindigkeit wie die Hauptströmung bewegt, wird vor Anwendung einer reibungsfreien Wand, bei der der Geschwindigkeitsgradient in Normalrichtung nicht gleich Null ist, bevorzugt und spiegelt besser das Geschwindigkeitsprofil bei der realen Situation wieder, wo die ruhende Luft herrscht und die Fahrbahn durch eine Nullgeschwindigkeit geprägt ist. Zusätzlich wurde auch die Rotation der Räder und der Antriebswellen berücksichtigt. Sie rotieren mit einer Winkelgeschwindigkeit $\omega = 55,555\text{ ms}^{-1}$ bei der Variante *slip*, bzw. $\omega = 111,11\text{ ms}^{-1}$ bei der Variante *move*.

Stationär kann nur die Simulation *Beginning-slip*- durchgeführt werden. Diese RANS Simulation wird innerhalb der 20000 Iterationen realisiert. Die instationären Simulationen *Beginning-slip*- URANS und PANS entsprechen einer gesamten Simulationszeit von 9s mit einem Zeitschritt $\Delta t = 0,001s$ und einer Iterationsanzahl von 10 bei URANS, bzw. 15 bei PANS. Die Simulationen mit der Gitterbewegung, d.h. *Beginning-move*- und *Manoeuvre-slip*- / *move*-, können nur instationär betrieben werden. Bei den *Beginning-move*-Simulationen wurde nur die Zeit von 0,9s simuliert. Die Simulation des Überholvorgangs, d.h. die Simulationen *Manoeuvre*- in beiden Versionen *slip* und *move*, dauerte insgesamt 0,54 s. Die Iterationsanzahl wurde bei den Simulationen mit Gitterbewegung aus Konvergenzgründen auf 25 erhöht.

In Verbindung mit dem $k - \varepsilon - \zeta - f$ Turbulenzmodell wird auch hier die hybride Wandfunktion angewandt. Zwar liegt die PKW-Geschwindigkeit an der Grenze, bei der die Effekte der Kompressibilität auftreten können, weil aber diese Geschwindigkeit nur aus der Reynoldsschen Ähnlichkeit resultiert, wird die Strömung weiterhin als inkompressibel betrachtet. Das Fluid wird nach wie vor als ideales Gas behandelt. Einheitlich wurden auch hier die *SIMPLE* Methode bei der Druck-Geschwindigkeits-Kopplung und die Diskretisierungsschemata *MINMOD Relaxed* und *AVL SMART Relaxed* verwendet. Für die Auflistung der Einstellungen nach der Nomenklatur der *AVL Fire* Benutzeroberfläche (*GUI*) und für eine detaillierte Beschreibung der Unterschiede zu Simulationen aus vorherigen Kapiteln 4 Umströmung eines realistischen Fahrzeuges (*RealCar*) und 5 Quasi-stationärer PKW-LKW Überholvorgang (*RealCar and Truck*) wird auf den Anhang C Einstellungen des Löser (*RealCar and Truck - Passing*) verwiesen.

6.1. Berechnungsvorbereitung

Bei der Gittergenerierung wurden die beiden *FAME Hexa* Domänen, *FAMEHexa_CAR_test3-3-G-7i_test8b.flm* für PKW und *FAMEHexa_TRUCK_G1-test6.flm* für LKW, aus dem Kapitel 5.1 übernommen. Die Domäne *FAME Hexa CAR* ist $6m$ lang, $1,5m$ breit, $1,8m$ hoch und besteht aus 27803023 Zellen. Die *FAME Hexa TRUCK* Domäne hat Abmessungen: $x = 8m$, $y = 1,581975m$, $z = 1,8m$ und 10429101 Zellen. Bei beiden *FAME Hexa* Gittern ist die Ausgangszellengröße *Max Cell Size* ist $0,05m$. Die beiden Domänen *FAME Hexa CAR* und *FAME Hexa TRUCK* werden durch die Funktion *Enlarge* in *AVL Fire GUI* von einem zum Teil strukturierten Gitter umhüllt. Weil die Situation einem Überholvorgang auf der Straße entsprechen soll, wurde für die Rechendomäne eine viereckige Geometrie ausgewählt. Die experimentell untersuchte Straßenmessung von Schrefl (Schrefl 2008) erstreckt sich zwischen den Positionen $x/L = -5$ und $x/L = 5$, dazu wurde auch die Rechendomäne entsprechend auf $50m$ vergrößert. Der Gitteraufbau erfolgt in der Position $x/L = 0,00$. Dieses Gitter wird als *RealCar_n_Truck_Passing-base.flm* genannt. Die Tabelle 6.1 zeigt die einzelnen Bauteile aus denen das fertige Gitter besteht. Um die Zellen zu sparen wird die Gitterdomäne in allen fünf Richtungen aus je zwei Blöcken mit unterschiedlicher Wachstumsrate aufgebaut. Die Tabelle 6.1 enthält auch die Dimensionen der Blöcke, die Anfangs- und Endzellgröße, die Reihenanzahl im Block, deren Wachstumsrate und die Richtung der Erweiterung. Die Gitterteile, die als *C (Car)* und *T (Truck)* bezeichnet sind, wurden um die *FAME Hexa* Domänen *CAR* und *TRUCK* separat aufgebaut. Das Gittersegment, das um die *FAME Hexa CAR* Domäne generiert wurde, mit den Abmessungen $x = 6m$, $y = 10m$, $z = 10m$ stellt den bewegten Teil des Gitters dar, der als die *Cell Selection: CAR_moving* bezeichnet ist. Die Blöcke, die sich vor und hinter der *moving Zone* befinden, stellen so genannte *buffer Zonen* dar. In diesen Blöcken wird das Gitter während des Überholvorgangs komprimiert und gedehnt. Damit das Gitter neben dem LKW gleichmäßig deformiert wird, wurden zwei Blöcke mit gleicher Länge $x = 15m$, Reihenanzahl 300 und einheitlicher Zellengröße $0,05m$ vor und hinter der *moving Zone* gewählt. Die Abgrenzung der beiden Deformationszonen stellt das *Surface Selection boundary*, das mit der Einlass- *inlet* und Auslassebene *outlet* übereinstimmt, dar. Die *C (Car)* und *T (Truck)* Baugruppen werden getrennt voneinander durch *Connect/Split* \rightarrow *Join Meshes, Conform connect* zusammengefügt. Danach werden sie zwischen einander durch *Connect/Split* \rightarrow *Join Meshes* ohne *Conform connect* verbunden. Dieses Vorgehen vermeidet die Verschmelzung der Knoten zwischen den beiden Domänen. An den benachbarten Wänden der *C* und *T* Domänen werden *Surface Selections* Namen *interface_CAR* und *interface_TRUCK* definiert, die dann nach *Connect/Split* \rightarrow *Arbitrary connect* durch ein *Interface* verbunden werden.

Tabelle 6.1: Gitterbauteile der Baugruppen *C* und *T* mit ihren Abmessungen, Zellgrößen und Schichtenanzahl bei der Ausgangsposition $x/L = 0,00$.

RealCar_n_Truck_Passing-base										
	Dimensions			Cell Size		Rows	Grow Rate	Direction		
	x [m]	y [m]	z [m]	min [m]	max [m]					
HEXA Car	6	1.5	1.8							
HEXA Truck	8	1.58198	1.8							
front C	1	15	10	10	0.05	0.05	300	300	1	x-
	2	9.3	10	10	0.05	0.2	74.4	74	4	x-
front T	1	14.7	10	10	0.05	0.05	294	294	1	x-
	2	9.3	10	10	0.05	0.2	74.4	74	4	x-
back C	1	15	10	10	0.05	0.05	300	300	1	x+
	2	4.7	10	10	0.05	0.2	37.6	37	4	x+
back T	1	13.3	10	10	0.05	0.05	266	266	1	x+
	2	4.7	10	10	0.05	0.2	37.6	37	4	x+
right T	1	8	2.41802	1.8	0.05	0.05	48.36	48	1	y+
	2	8	6	1.8	0.05	0.2	48	48	4	y+
left C	1	6	2.5	1.8	0.05	0.05	50	50	1	y-
	2	6	6	1.8	0.05	0.2	48	48	4	y-
up C	1	6	10	2.2	0.05	0.05	44	44	1	z+
	2	6	10	6	0.05	0.2	48	48	4	z+
up T	1	8	10	2.2	0.05	0.05	44	44	1	z+
	2	8	10	6	0.05	0.2	48	48	4	z+
mesh		50	20	10						

Bei der Überholung ist die Position des LKWs fixiert, der PKW bewegt sich in negativer x -Richtung. Der Ursprung des Koordinationssystems befindet sich nur bei der Position $x/L = 0,00$ in der Mitte der PKW-Vorderachse. Die Gitterbreite ist symmetrisch zu der Überholungsachse aufgebaut. Die Rechendomäne ist nicht mehr auf die Abmessungen der Düse bezogen, wie es in den vorherigen Kapiteln der Fall war. Damit die Ränder der Rechendomäne keinen Einfluss auf die Strömung haben, wurde sie $50m$ lang, $20m$ breit und $10m$ hoch konzipiert. In der Tabelle 6.2 sind Einstellungen des *Arbitrary connect* und die Zellenanzahl der Flächen *interface_CAR*, *interface_TRUCK* aufgelistet.

Tabelle 6.2: Liste der in diesem Kapitel verwendeten Interfaces, mit dazugehörigen *Selections*, Zellenanzahl und weiteren Einstellungen.

Mesh	Interface					project to interface A	remaining boundary face parts
	Arbitrary interface	interface A	# cells	interface B	# cells		
RealCar_n_Truck-cut-2lc1lt_Passing-shifted-x.flm	Interface1	interface_CAR	232560	interface_TRUCK	248323	yes	ignore

Nach dieser Gittergenerierung wird die *moving Zone* um $15m$ in positiver x -Richtung in die Anfangsposition $x/L = -6$ mittels einer Simulation verschoben. Anschließend wird das Gitter aus dem *0ten Time Step* exportiert. Bei diesem Gitter wird durch *Checks* \rightarrow *Check Set: FAME_Hexa* die Gitterqualität (vor allem nach *Negative volume*, *Partially negative volume*) getestet. Es ist möglich, dass bei einer Verschiebung über längere Distanz im Gitter negative Volumina entstehen. So modifiziertes Gitter wird als *RealCar_n_Truck-cut-2lc1lt_Passing-shifted-x.flm* genannt. Die Bezeichnung *cut-2lc1lt* bedeutet, dass unter den PKW- (*car*) Rädern **2** Zellschichten (*layers*) und unter der LKW (*truck*) **1** Zellschicht (*layer*) ausgeschnitten wurden. Diese Maßnahme lässt nur eine Zellschicht unter den schwebenden Rädern und reduziert somit ihre Unterströmung auf das Minimum. Die Zellenanzahl von in diesem Kapitel verwendetem Gitter bringt die Tabelle 6.3. Wegen der Länge des Überholvorgangs ist die Zellenanzahl deutlich gestiegen.

Tabelle 6.3: Liste der in diesem Kapitel verwendeten Gitter mit Zellenanzahl.

Project	Case	Mesh	No. of cells
RealCar_n_Truck_Passing		RealCar_n_Truck-cut-2lc1lt_Passing-shifted-x.flm	77349962

Die Gitterbewegung wird anhand des Bild 6.1 beschrieben. Auf dem Bild oben ist das Gitter auf der Ebene $z = 0,08m$ und der PKW-Zentralebene $y = 0m$ in der Anfangsposition $x/L = -6$ gezeigt. Die *moving Zone*, die der Länge der Domäne *FAME Hexa CAR* entspricht, fängt bei $x = 14,3m$ an und endet bei $x = 20,3m$. Davor befinden sich die gedehnten Bauelemente *front C 1*, *front C 2* und dahinten die komprimierten Bauelemente *back C 1*, *back C 2*. In der Endposition $x/L = 6$, auf dem Bild unten dargestellt, wurde die *moving Zone* um $30m$ in negativer x -Richtung verschoben und befindet sich zwischen $x = -15,7m$ und $x = -9,7m$. Die Bauelemente *front C 1*, *front C 2* sind jetzt gepresst und die *back C 1*, *back C 2* sind gedehnt. Die Abbildung der beiden Positionen zeigt, wie die Bauelemente *front C 1*, und *back C 1* vor allem auf der Höhe des LKWs immer für gleichmäßige Deformation der Zellschichten sorgen.

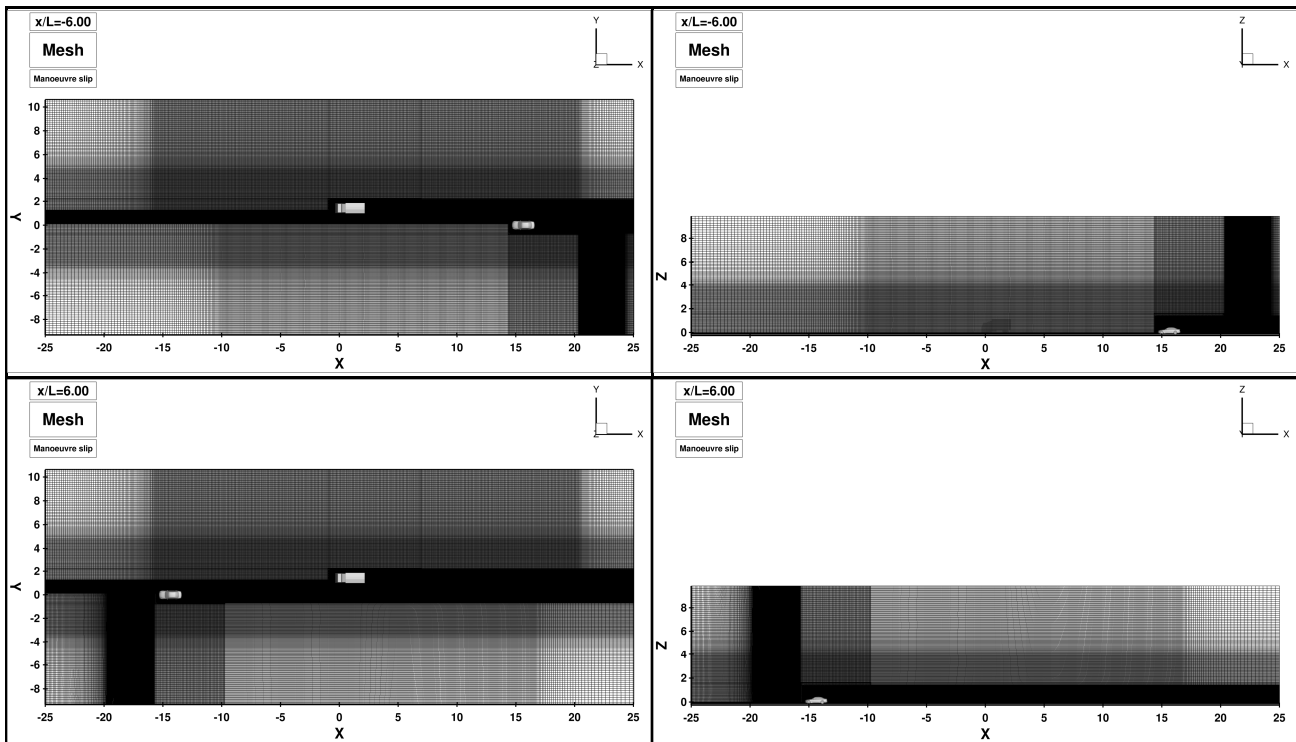


Bild 6.1: Darstellung der Vernetzung und Gitterbewegung bei der Anfangs- $x/L = -6,00$ und Endposition $x/L = 6,00$.

Bei der Gittergenerierung des deformierten Teils muss die Komprimierung und Dehnung der Zellen berücksichtigt werden. Die Zellgröße bei der maximalen Komprimierung bzw. Dehnung muss an die Zellgröße des nichtbewegten Teils angepasst werden. Bei einem zu großen Unterschied zwischen der Zellgrößen kann das *interface* wie eine Barriere für die Strömung wirken.

Diese Gittergenerierung wurde auf das Gitter *RealCar_n_Truck-cut-2lc1lt_Passing-shifted-x.flm*, das bei den Fällen *slip* zum Einsatz kommt, bezogen. Für Fälle *move* wurde das Gitter um die $z = 0$ Achse um 180° gedreht und als *RealCar_n_Truck-cut-2lc1lt_Passing-shifted-x_moved1.flm* bzw. *RealCar_n_Truck-cut-2lc1lt_Passing-shifted-x_moved1-50m.flm* genannt.

6.2. Ergebnisauswertung und Diskussion

Die Auswertung dieses Kapitels erfolgt wieder in zwei Teilen. Zuerst wird auf die strömungstechnische Auswertung eingegangen. Danach wird die computertechnische Betrachtung der Auswertung folgen.

6.2.1. Strömungstechnische Auswertung

Die Simulation des dynamischen Überholvorgangs bezieht sich auf die Straßenmessung, die von Schrefl (Schrefl 2008) mit den realen Fahrzeugen BMW 5er-Reihe E60 und MAN L2000 auf einer Distanz von $-5 < x/L < 5$ durchgeführt wurde. Die Länge L entspricht wieder der LKW-Länge: $L = 2,5m$. Im Experiment beträgt die LKW-Geschwindigkeit $80 km/h$ und die PKW-Geschwindigkeit $160 km/h$. Bei der Simulation wurden die Fahrzeugmodelle im Maßstab 1:2,5 aus dem vorherigen Kapitel 5 Quasi-stationärer PKW-LKW Überholvorgang (*RealCar and Truck*) übernommen und die Geschwindigkeit wurde unter Berücksichtigung der Reynoldsschen Ähnlichkeit auf $v_{LKW} = 200 km/h = 55,555 m/s$ und $v_{PKW} = 400 km/h = 111,11 m/s$ angepasst. Die Überholung an sich dauert kurze Zeit. Damit die Strömung hinter den Fahrzeugen Zeit hat sich zu entwickeln, wurden am Anfang Vorbereitungssimulationen durchgeführt, die als *Beginning*- bezeichnet werden. Bei den *Beginning*- Simulationen befindet sich der PKW in der Position $x/L = -6$ und beide Fahrzeuge bewegen sich mit gleicher Geschwindigkeit von $55,555 m/s$. Nach Berechnung von mehreren *FTTs* entwickelt sich die Strömung hinter beiden Fahrzeugen. Dieses Strömungsfeld dient dann als Startfeld für die Simulationen des Überholvorgangs, die als *Manoeuvre*- bezeichnet werden. Bei den *Manoeuvre*- Simulationen bewegt sich der PKW mit $111,11 m/s$ im Vergleich zu den *Beginning*- Simulationen, bei denen es nur $55,555 m/s$ waren. Aus diesem Grund verläuft der Überholvorgang zwischen $-6 < x/L < 6$ im Vergleich mit dem Experiment, bei

dem die Messdaten zwischen $-5 < x/L < 5$ erfasst wurden. Die PKW-Umströmung hat also $1(x/L) = 2,5m$ um sich der erhöhten Geschwindigkeit anzupassen. Sowohl die *Beginning*-Berechnungen als auch die *Manoeuvre*-Berechnungen werden auf zwei Versionen *slip* und *move* aufgeteilt. Bei der Version *slip* wird die LKW-Geschwindigkeit durch die Anströmgeschwindigkeit realisiert. Dabei wird die Entstehung der Grenzschicht auf der Fahrbahn durch eine vordefinierte Geschwindigkeit verhindert; von daher die Bezeichnung *slip*. Die Version *move* zeichnet sich durch die Fahrzeugumströmung, die nur durch die Gitterbewegung erzeugt wird, aus. Es ist dabei keine Anströmung vorhanden. Zum Schluss wird zwischen den *Manoeuvre-slip*- Fällen eine Studie der zeitlichen Diskretisierung durchgeführt. Die Tabelle 6.4 zeigt eine Übersicht von in diesem Kapitel durchgeführten Simulationen.

Tabelle 6.4: Liste der in diesem Kapitel durchgeführten Simulation mit entsprechendem Simulationsverfahren und Zeitschrittgröße.

Version	Case	TS [s]	Version	Case	TS [s]
Beginning-cut-2lc1lt-slip-	RANS	-	Manoeuvre-cut-2lc1lt-slip-	URANS	0.0001
	URANS	0.001		PANS	
	PANS	0.001			
Beginning-cut-2lc1lt-slip-rot-	URANS	0.001	Manoeuvre-cut-2lc1lt-slip-rot-		0.0005
					0.00025
	PANS	0.001		PANS	0.001
Beginning-cut-2lc1lt-move-	URANS	0.0005	Manoeuvre-cut-2lc1lt-move-	URANS	0.0005
Beginning-cut-2lc1lt-move-rot-	PANS	0.0001	Manoeuvre-cut-2lc1lt-move-rot-	PANS	0.00025

6.2.1.1. Vorbereitungssimulationen (*Beginning*)

Bei den URANS und PANS *Beginning*- Simulationen entsteht ein Strömungsfeld, das dann als Startfeld für die *Manoeuvre*- Simulationen dient. Der PKW befindet sich in der Position $x/L = -6$ und beide Fahrzeuge haben eine Geschwindigkeit von $v_{PKW} = v_{LKW} = 55,555 \text{ m/s}$.

Bei der Variante *Beginning-slip*- wird zuerst eine RANS Simulation gestartet. Sie wird aus einem Feld konstanter Geschwindigkeit initialisiert. Das Anlaufen muss stark unterrelaxiert werden. Durch eine Tabelle wird die Unterrelaxation in 500 Iterationen schrittweise an den Normalwert angehoben. Die RANS Berechnung beträgt insgesamt 20000 Iterationen. Das Ergebnis dient als eine Initialisierung für die URANS Simulation ohne rotierende Räder. Der Start dieser Simulation wird wieder stark unterrelaxiert und in 0,2s angehoben. Insgesamt wurden die 4,5s mit $\Delta t = 0,001s$ berechnet, was wiederum $9FTT$ entspricht. Anschließend wird bei weiteren $9FTT$ in der Simulation *slip-rot*- URANS die Rotation der Räder des PKWs eingeschaltet. Initialisiert wird aus $t = 4,5s$ der URANS Simulation, bei der das Anlaufen genauso behandelt wird. Beide URANS Simulationen betragen zusammen 9s.

Ähnlich wird aus der URANS Simulation ohne rotierende Räder die PANS Simulation ohne rotierende Räder gestartet. Eine Änderung der Unterrelaxation beim Anlaufen ist nicht nötig. Nach 4,5s wurde wieder die Rotation der Räder eingeschaltet. Die Simulation *slip-rot*- PANS läuft weitere 4,5s. Zusammen dauern die beiden PANS Simulation 9s und haben den gleichen Zeitschritt $\Delta t = 0,001s$. Das Bild 6.2 zeigt die Luftwiderstandsbeiwerte c_d , c_s und c_l und die Momentbeiwerte c_{M_x} , c_{M_y} und c_{M_z} von allen fünf *Beginning-slip*- Simulationen über deren Rechendauer.

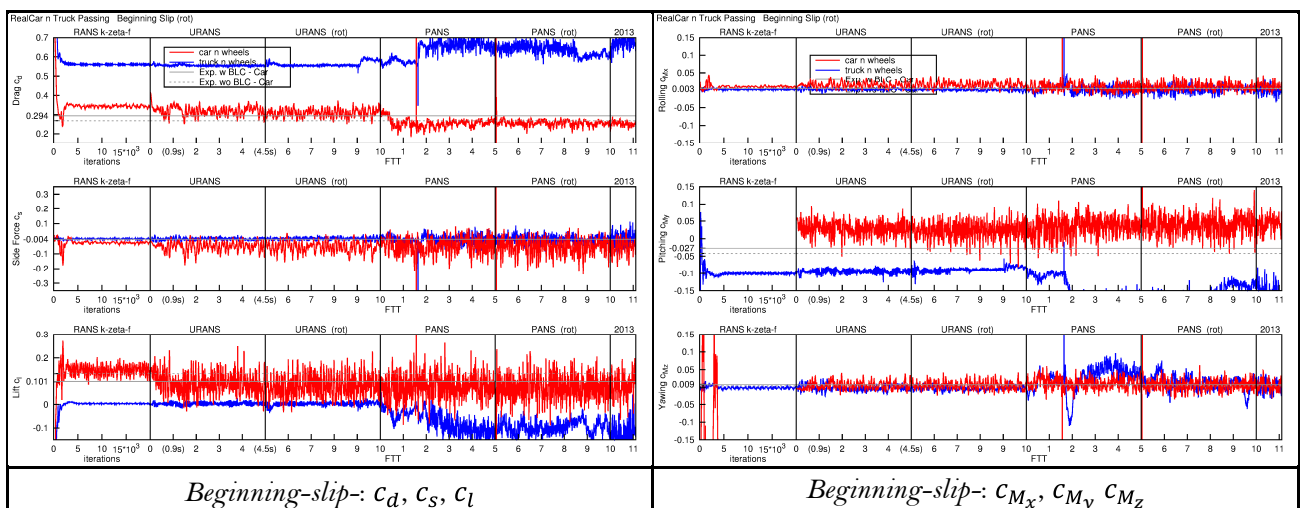


Bild 6.2: Verläufe des Luftwiderstands c_d , Seitenkraft c_s , Auftriebs c_l , des Roll- c_{M_x} , Nick- c_{M_y} und Giermomentbeiwerts c_{M_z} des PKWs (mit Rädern) und LKWs bei *Beginning-slip*- Simulationen mit und ohne Rotation der Räder.

Die Rotation der Räder zeigt sowohl bei den URANS als auch bei den PANS Simulationen keine große Auswirkung auf die Luftwiderstände, bzw. Momente des PKWs. Die Rotation der rotierenden Teile an dem PKW wird durch eine Winkelgeschwindigkeit an der Oberfläche dargestellt. Dadurch kann das Ventilationsmoment und die aus der Theorie bekannte Reduzierung des Luftwiderstandsbeiwertes c_d nicht realisiert werden. Die Verläufe der Luftwiderstände und Momente werden nicht weiter ausgewertet, weil zu der Position $x/L = -6$ keine experimentellen Daten vorhanden sind. Zum Vergleich werden in den Grafen die Luftwiderstände und Momente aus der experimentellen Messung eines Solowagens im Windkanal mit und ohne Grenzschichtabsaugung *BLC* aufgetragen. Nach der Theorie einer Windschattenfahrt sollte schon bei großer Entfernung der beiden Fahrzeuge trotzdem ein reduzierter Luftwiderstand c_d des Folgefahrzeugs bemerkbar sein. Das ist bei der PANS Simulation auch der Fall. Die Grafen haben weiterhin eher einen informativen Charakter und dienen zur Beobachtung der Konvergenz während der Berechnung.

Bei der Variante *Beginning-move*- kommen wegen der Gitterbewegung nur die instationären Simulationen in Frage. Die URANS Simulation wird ohne Rotation der Räder mit einem Zeitschritt von $\Delta t = 0,0005s$ über $0,9s$, was $1FTT$ entspricht, gerechnet. Im Vergleich dazu wird bei der PANS Simulation die Räderrotation berücksichtigt. Sie wird mit einem feineren Zeitschritt von $\Delta t = 0,0001s$ über die gleiche Zeit von $0,9s$ simuliert. Da bei der Simulationszeit von $0,9s$ eine Distanz von $50m$ hinterlegt wird, wurden die URANS und PANS Simulationen separat voneinander berechnet. Das Anlaufen ist bei beiden mit einem abgestuft verkleinertem Zeitschritt verbunden. Dies erfolgt durch eine Tabelle (siehe Tabelle). Innerhalb von $0,001s$ werden 279 *Time Steps* berechnet. So konnte die starke Unterrelaxation auf die ersten $0,000025s$ beschränkt werden. Den Durchlauf von den Luftwiderstandsbeiwerten c_d , c_s und c_l und den Momentbeiwerten c_{M_x} , c_{M_y} und c_{M_z} zeigt das Bild 6.3.

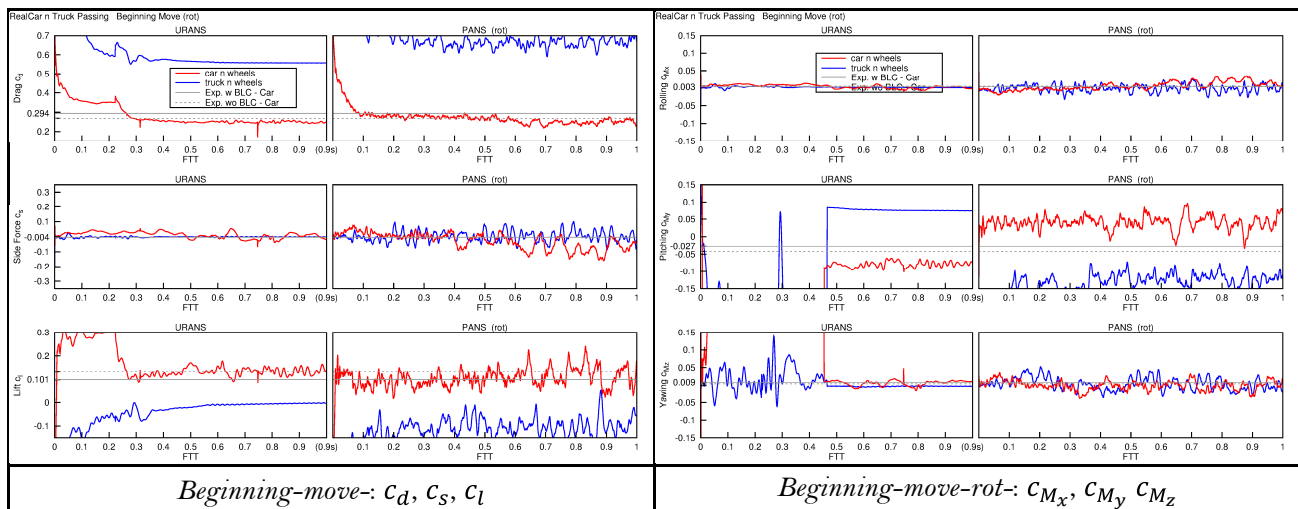


Bild 6.3: Verläufe des Luftwiderstands c_d , Seitenkraft c_s , Auftriebs c_l , des Roll- c_{M_x} , Nick- c_{M_y} und Giermomentbeiwerts c_{M_z} des PKWs (mit Rädern) und LKWs bei *Beginning-move*- Simulationen mit und ohne Rotation der Räder.

Weil die Simulationen mit verschiedenen Zeitschritten berechnet wurden, können sie nicht direkt miteinander verglichen werden. Unter der Annahme, dass die Rotation der Räder keine Auswirkung auf die Luftwiderstände hat, sinkt bei der *move* Variante im Vergleich zu der *slip* Variante auch der Luftwiderstand c_d des Folgefahrzeugs bei der URANS Simulation unter den c_d -Wert eines im Windkanal mit Grenzschichtabsaugung *BLC* gemessenen Solofahrzeugs. Dadurch entspricht die Reduzierung des Luftwiderstandes c_d sowohl bei PANS als auch bei URANS der Theorie einer Windschattenfahrt. Bei der URANS Simulation wurde die mitbewegte Rotationsachse zur Berechnung der Momente erst während der Simulation eingestellt. Der Verlauf der Luftwiderstandsbeiwerte und der Momentbeiwerte ist bei der *move* Variante im Vergleich zu der Variante *slip* mit kleineren Oszillationen verbunden.

6.2.1.2. Überholvorgangssimulationen (*Manoeuvre*)

Bei den Simulationen des Überholvorgangs *Manoeuvre* bleibt die LKW-Geschwindigkeit bei $v_{LKW} = 55,555 \text{ m/s}$; die PKW-Geschwindigkeit steigt jedoch im Vergleich zu den *Beginning*-Simulationen von $55,555 \text{ m/s}$ auf $v_{PKW} = 111,11 \text{ m/s}$. Bei der *slip* Variante wird die LKW-Geschwindigkeit durch die Anströmgeschwindigkeit realisiert. Bei der *move* Variante bewegt sich das ganze Gitter (*domain_moving*) mit einer Geschwindigkeit von $55,555 \text{ m/s}$. Die Geschwindigkeitsdifferenz des überholenden PKWs wird in beiden Fällen durch die Bewegung von *node selection car_moving* mit $55,555 \text{ m/s}$ definiert. Der Überholvorgang läuft zwischen den Positionen $-6 < x/L < 6$ ab. Bei der *slip* Variante erstreckt er sich auf 30m ; bei der *move* Variante beträgt die Distanz 80m aufgrund der doppelten Bewegung. Bei beiden Varianten dauert das Manöver $0,54\text{s}$. Die *Manoeuvre*-Simulationen werden durch eine passende *Beginning*-Simulation initialisiert. Die Anpassung der PKW-Geschwindigkeit von $55,555 \text{ m/s}$ auf $111,11 \text{ m/s}$ hat $1 x/L$ Zeit, damit die Simulation mit der Straßenmessung, die zwischen $-5 < x/L < 5$ verlaufen ist, verglichen werden kann. Die Darstellung der Strömung wird in Vergleich zu den acht diskreten Positionen aus Kapitel 5 Quasi-stationärer PKW-LKW Überholvorgang (*RealCar and Truck*) gesetzt und deswegen in den gleichen Positionen $x/L = -1,60; -1,20; -0,80; -0,40; 0,00; 0,39; 0,77; 1,17$ ausgewertet. Der Abstand zwischen beiden Fahrzeugmodellen beträgt weiterhin $\Delta y_{1:2,5} = 0,6\text{m}$, was mit dem Experiment, bei dem der Abstand $\Delta y_{1:1} = 1,5\text{m}$ beträgt, korrespondiert.

Alle durchgeführten *Manoeuvre*-Simulationen werden anhand der Luftwiderstandsbeiwerte c_d , c_s und c_l und der Momentenbeiwerte c_{M_x} , c_{M_y} und c_{M_z} zusammengefasst. Weil die Überholung ein dynamischer Vorgang ist, können die Werte nicht gemittelt werden. Stattdessen werden die Verläufe ausgewertet.

Das Bild 6.4 zeigt den ersten Vergleich der Luftwiderstandsbeiwerte c_d , c_s und c_l bei der URANS *slip* und der URANS *move* Simulation. Zusätzlich dazu zeigt das nächste Bild 6.5 den Vergleich zwischen der PANS *slip* und der PANS *move* Simulation. Trotz der unterschiedlichen Zeitschritten lässt sich zwischen den Varianten *slip* und *move* eine Schlussfolgerung ziehen. Die kontinuierliche Senkung des Luftwiderstandes c_d bei dem Folgefahrzeug aus der Windschattenfahrttheorie schafft nur die *slip* Variante wiedergeben. Der Luftwiderstand c_d des Folgefahrzeugs bei der *move* Version reagiert nicht auf die Näherung zu dem Führungsfahrzeug und gibt noch nicht einmal die deutliche Reduzierung des Luftwiderstandes c_d bei der Ansaugung in den Positionen $x/L = -1,20$ und $-0,80$ wieder. Bei einem groben Zeitschritt werden nicht alle Effekte richtig abgebildet. Somit wird bei der URANS Simulation mit dem Zeitschritt $\Delta t = 0,0005\text{s}$ der Maximalwert des PKW-Luftwiderstandes c_d verzögert und die Absenkung bei der Position $x/L = 1,17$ kleiner ausgeprägt. Vergleicht man die *slip* und *move* PANS Simulationen mit dem gleichen Zeitschritt von $\Delta t = 0,00025\text{s}$, ist der PKW-Luftwiderstand c_d in dem ganzen Verlauf bei der *move* Variante größer als bei der *slip* Variante. Experimentell wurde nur der Verlauf der Seitenkraft c_s und des Giermoments c_{M_z} von dem PKW aufgenommen. Im Vergleich zu dem Experiment wird eine negative Seitenkraft c_s des PKWs am Anfang des Überholvorgangs hauptsächlich bei den *slip* Simulationen beobachtet. Die URANS *slip* Simulation kann die positive PKW-Seitenkraft c_s , die durch den Ansaugeffekt bei den Positionen $x/L = -1,20$ und $-0,80$ verursacht wird, nicht wiedergeben, obwohl sie mit dem kleinsten Zeitschritt von $\Delta t = 0,0001\text{s}$ berechnet wurde. Im Gegensatz dazu bietet die URANS *move* Simulation mit dem größten Zeitschritt von $\Delta t = 0,0005\text{s}$, was die Seitenkraft c_s angeht, eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment. Wegen der unterschiedlichen LKW-Länge im Experiment ($L_{LKW1:1} = 8\text{m}$) und bei der Simulation ($L_{LKW1:2,5} = 2,5\text{m} \rightarrow L_{LKW1:1} = 6,25\text{m}$) findet der Umschlag der PKW-Seitenkraft c_s später statt. Diese Behauptung unterstützt auch der Verlauf bei der *slip* PANS Simulation mit dem kleinsten Zeitschritt von $\Delta t = 0,0001\text{s}$. Der Verlauf der Seitenkraft c_s bei den Simulationen nähert sich mehr der experimentellen Messung der stationären Positionen aus dem Windkanal an. Nach der Überholung scheint die Abbildung der positiven Seitenkraft c_s des PKWs bei der PANS *move* Simulation problematisch zu sein. Der Auftrieb c_l des PKWs oszilliert bei den meisten Fällen so stochastisch, dass sich aus seinem Verlauf keine Aussagen treffen lassen. Interessanterweise lässt sich eine Erhöhung des PKW-Auftriebs c_l zwischen den Positionen $x/L = -1,60 \div 1,17$ bei den Simulationen mit dem größten Zeitschritt von $\Delta t = 0,0005\text{s}$ beobachten.

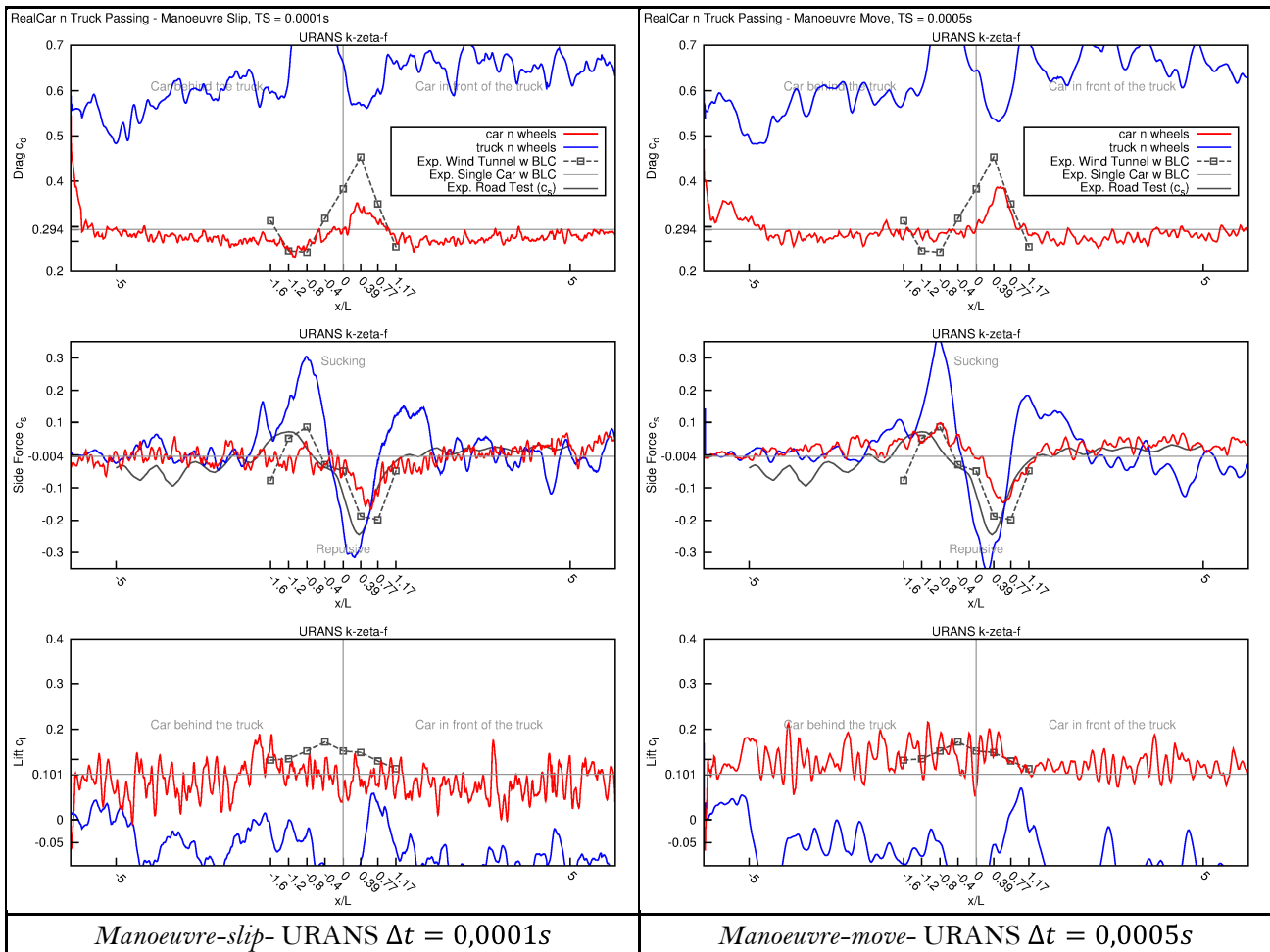


Bild 6.4: Vergleich der Verläufe des Luftwiderstands c_d , der Seitenkraft c_s , des Auftriebs c_l des PKWs (mit Rädern) und LKWs beim URANS Verfahren der *Manoeuvre-slip- / move-* Simulationen ohne Rotation der Räder.

Weiterhin werden die *slip* und *move* Simulationen getrennt voneinander ausgewertet. Zuerst werden die URANS und PANS *slip* Simulationen mit dem gleichen Zeitschritt von $\Delta t = 0,0001s$ miteinander verglichen. Der Luftwiderstand c_d des PKWs bei der *slip* URANS Simulation wird am Anfang des Manövers größer und zeigt während der Überholung ein ausgeprägteres Maximum und Minimum als bei der *slip* PANS Simulation. Die Wiederabsenkung des PKW-Luftwiderstandes c_d bei der Position $x/L = 1,17$ wird durch die *slip* PANS Simulation besser wiedergegeben. Bei der PKW-Seitenkraft c_s , von der experimentelle Daten vorhanden sind, bringt die *slip* PANS Simulation eine bessere Übereinstimmung als die *slip* URANS. In den hinteren Positionen zeigt *slip* PANS eine größere negative Seitenkraft c_s des PKWs als *slip* URANS, was dem Experiment mehr entspricht. Die *slip* URANS Simulation kann den Anstieg der PKW-Seitenkraft c_s durch den Ansaugeneffekt bei den Positionen $x/L = -1,20$ und $-0,80$ nicht korrekt nachbilden. Im Gegensatz dazu wird durch die *slip* PANS Simulation an dieser Stelle ein ausgeprägtes Maximum der PKW-Seitenkraft c_s erreicht. Dieser Anstieg und der Umschlag der PKW-Seitenkraft c_s ist bei den Simulationen im Vergleich mit der Straßenmessung um zirka eine Position $x/L \approx 0,4 \rightarrow x \approx 1m$ versetzt und korrespondiert mehr mit der Windkanalmessung. Die Versetzung entspricht den unterschiedlichen Fahrzeuglängen des LKWs $\Delta L_{LKW} = L_{LKW1:2,5}^{Real} - L_{LKW1:2,5}^{Modell} = 3,2m(L_{LKW1:1}^{Real} = 8m) - 2,5m = 0,7m$. Die Position des Führerhauses ist bei dem realen Fahrzeug und dem Fahrzeugmodell identisch; also muss der Wiederanstieg der PKW-Seitenkraft c_s zwischen der Straßenmessung und der Simulation übereinstimmen. Der Auftrieb c_l des PKWs oszilliert bei den Simulationen *slip* URANS und PANS um den experimentell gemessenen Wert des Solofahrzeugs und reagiert nicht wirklich auf die Überholung. Der Grund für die starke Oszillation ist die Randbedingung auf der Fahrbahn und die Absenz der Grenzschicht.

Als Nächstes werden die *move* URANS und PANS Simulation miteinander verglichen. Im Unterschied zu der *slip* Variante zeigt die *move* PANS Simulation allgemein einen größeren Luftwiderstand c_d des PKWs als bei

move URANS. In den hinteren Positionen steigt bei beiden Simulationen der PKW-Luftwiderstand c_d , zuwider der Windschattenfahrttheorie, kontinuierlich an. Die Absenkung des PKW-Luftwiderstandes c_d bei den Positionen $x/L = -1,20$ und $-0,80$ ist auch nicht deutlich. Der PKW-Luftwiderstand c_d erreicht bei beiden Simulationen sein Maximum bei der Position $x/L = 0,39$ und hält den Wert kurz an. Der Verlauf der PKW-Seitenkraft c_s kann bei der *move* PANS Simulation die experimentelle Kurve nicht folgen. Das Abstoßen des PKWs bei der Positionen $x/L = 0,39; 0,77$ ist zu wenig ausgeprägt und nach der Überholung herrscht widersprüchlicherweise zum Teil eine negative Seitenkraft c_s des PKWs. Die fehlende Grenzschicht auf der Fahrbahn verursacht auch in diesem Fall bei beiden *move* URANS und PANS Simulationen starke Oszillationen des PKW-Auftriebs c_l , dessen Amplitude stärker als die Auswirkung der Überholung ist.

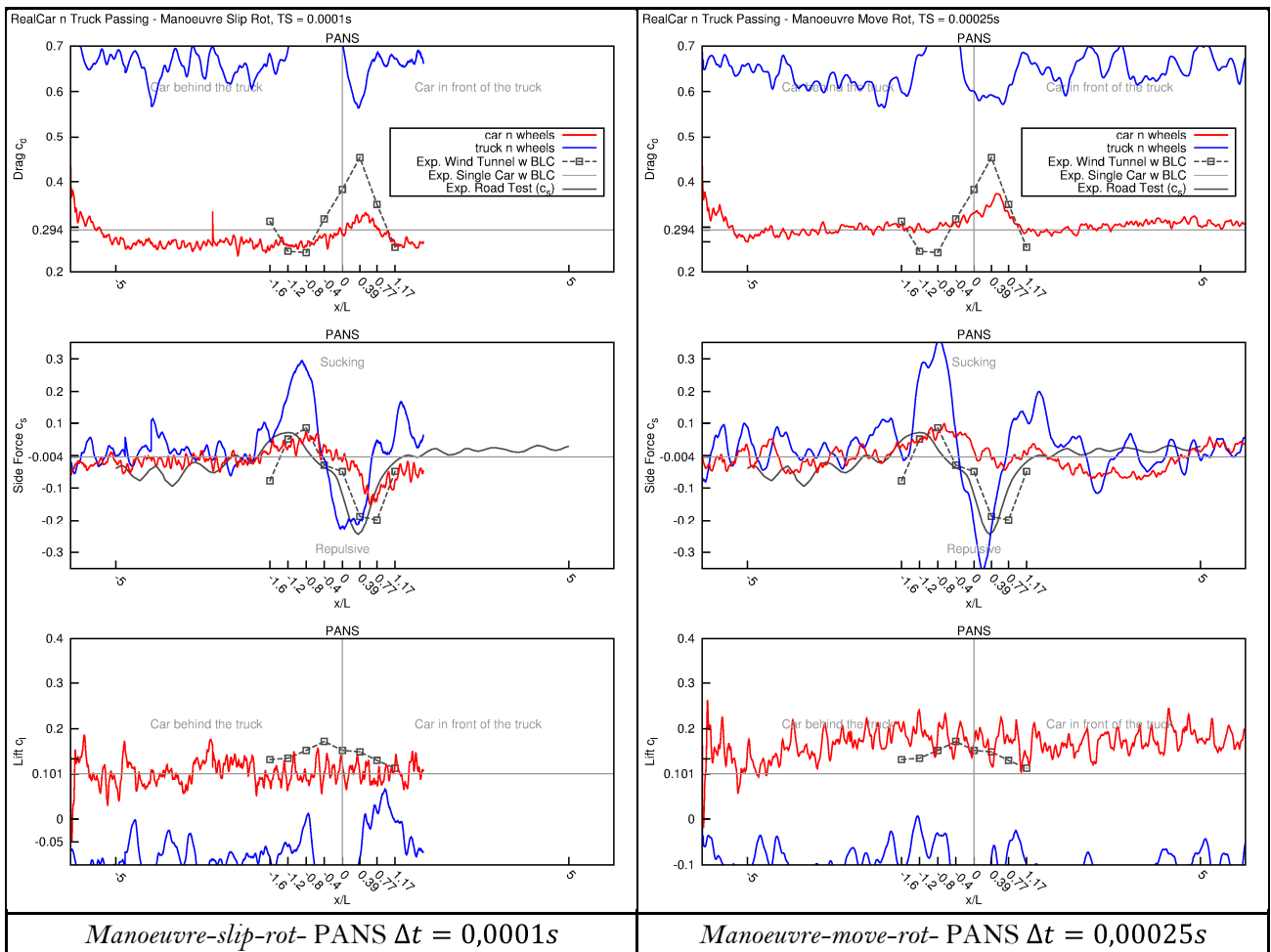


Bild 6.5: Vergleich der Verläufe des Luftwiderstands c_d , der Seitenkraft c_s , des Auftriebs c_l des PKWs (mit Rädern) und LKWs beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip- / move-* Simulationen mit Rotation der Räder.

Nach dem Vergleich der *slip* und *move* Varianten wird die *slip* vor der *move* Variante bevorzugt. Außerdem steht das PANS Verfahren im Fokus dieser Arbeit. Aus diesen Gründen wurde anhand der *slip* PANS Simulationen eine Studie der zeitlichen Diskretisierung durchgeführt. Die Bilder Bild 6.5 und Bild 6.6 zeigen die Verläufe der Luftwiderstandsbeiwerte der *slip* PANS Simulationen mit unterschiedlichen Zeitschritten: $\Delta t = 0,0001s$, $\Delta t = 0,00025s$ und $\Delta t = 0,0005s$. Mit Blick auf die Rechenzeit wird untersucht, ob die Simulation mit dem größten Zeitschritt schon zufriedenstellende Ergebnisse liefert. Bei dem PKW zeigt der Verlauf des Luftwiderstandes c_d bei dem Zeitschritt $\Delta t = 0,0005s$ einen durchgängig erhöhten Wert. Der PKW-Luftwiderstand c_d erreicht bei der Simulation mit $\Delta t = 0,0005s$ sein Maximum erst nach der Position $x/L = 0,39$. Des Weiteren wird danach die Wiederabsenkung des PKW-Luftwiderstandes c_d bei der Position $x/L = 1,17$ nicht erreicht. Bei den Simulationen mit $\Delta t = 0,00025s$ und $\Delta t = 0,0001s$ herrschen deutlich bessere Übereinstimmungen mit der Windschattenfahrttheorie. Der PKW-Luftwiderstand c_d in den hinteren Positionen wird kleiner als der Luftwiderstandes c_d eines Solofahrzeugs. Er sinkt kontinuierlich, wobei er bei der Positionen $x/L = -1,20; -0,80$ sein Minimum erreicht. Der Anstieg des PKW-Luftwiderstandes c_d ist bei $\Delta t = 0,00025s$ steiler

als bei $\Delta t = 0,0001s$ und erreicht sein Maximum vor der Position $x/L = 0,39$. Der PKW-Luftwiderstand c_d bei der Simulation mit $\Delta t = 0,0001s$ steigt allmählich und hat sein Maximum bei der Position $x/L = 0,39$, was sich als mehr plausibel zeigt. Die Absenkung des PKW-Luftwiderstandes c_d wird dann bei $\Delta t = 0,0001s$ steiler als bei $\Delta t = 0,00025s$ und somit tritt das lokale Minimum bei der Position $x/L = 1,17$ auf. Danach erfolgt bei beiden Simulationen wieder ein kontinuierlicher Anstieg des PKW-Luftwiderstandes c_d . Der Verlauf des LKW-Luftwiderstandes c_d zeichnet sich beim groben Zeitschritt durch große Oszillationen aus, die durch die Zeitschrittverkleinerung verfeinert werden. Das Maximum erreicht der LKW-Luftwiderstand c_d bei allen drei Simulationen bei ungefähr $x/L = -0,80$. Sein Minimum entsteht bei der Position $x/L = 0,39$, wobei bei der Simulation mit dem Zeitschritt $\Delta t = 0,0005s$ der Peak mit einer falschen Einsattelung verbunden ist. Anhand des Verlaufs der PKW-Seitenkraft c_s ist ersichtlich, dass der grobe Zeitschritt $\Delta t = 0,0005s$ eine Dämpfung der wirkenden Kräfte verursacht. Dabei wird der Anstieg der PKW-Seitenkraft c_s nicht richtig abgebildet. Sie überschlägt sich zu früh, das Minimum wird früher erreicht und der ebenso frühere Wiederanstieg ist mit einem inkorrekten positiven Peak der PKW-Seitenkraft c_s verbunden. Der Verlauf der PKW-Seitenkraft c_s bei $\Delta t = 0,00025s$ und bei $\Delta t = 0,0001s$ bietet eine deutlich bessere Übereinstimmung mit den experimentellen Daten. Am Anfang ist sie wie bei der Straßenmessung negativ und steigt kontinuierlich an. Das Maximum und Minimum sind deutlich ausgeprägt, zu der Straßenmessung leicht versetzt und stimmen mehr mit der Windkanalmessung überein. Der Wiederanstieg der PKW-Seitenkraft c_s bei $\Delta t = 0,00025s$ und $\Delta t = 0,0001s$ korrespondiert wieder mit der Straßenmessung und die Simulationen zeigen eine positive Seitenkraft c_s des PKWs bei den vorderen Positionen. Die Seitenkraft c_s des LKWs wird bei der Simulation mit $\Delta t = 0,0005s$ im Vergleich mit $\Delta t = 0,00025s$ und $\Delta t = 0,0001s$ zu stark positiv nachgebildet. Bei $\Delta t = 0,0005s$ wird das Maximum der LKW-Seitenkraft c_s überschätzt und das Minimum erreicht nicht die negativen Werte. Im Gegensatz dazu zeigen die Simulationen $\Delta t = 0,00025s$ und $\Delta t = 0,0001s$ einen positiven Maximalwert der LKW-Seitenkraft c_s zwischen den Positionen $x/L = -1,20$ und $-0,80$ und einen negativen Minimalwert zwischen den Positionen $x/L = 0,00$ und $0,39$. Bei der Simulation $\Delta t = 0,00025s$ hat das Maximum der LKW-Seitenkraft c_s die Form einer Einsattelung, während sie bei $\Delta t = 0,0001s$ mit einem steilen An- und Abstieg verbunden ist. Das Minimum ist dann bei beiden Simulationen als eine Einsattelung abgebildet. Die Simulation $\Delta t = 0,00025s$ zeigt anschließend bei dem Wiederanstieg der LKW-Seitenkraft c_s einen größeren Peak als bei $\Delta t = 0,0001s$. Die Erhöhung des PKW-Auftriebs c_l während der Überholung wird interessanterweise nur bei der Simulation mit dem größten Zeitschritt $\Delta t = 0,0005s$ abgebildet. Bei den Simulationen mit kleineren Zeitschritten $\Delta t = 0,00025s$ und $\Delta t = 0,0001s$ dominiert bei dem PKW-Auftrieb c_l die Frequenz der Schwankungen über die Auswirkung der Überholung. Bei dem LKW-Auftrieb c_l sind bei allen drei Simulationen zwei Maxima ungefähr zwischen $x/L = -1,20$ und $-0,80$ und zwischen $x/L = 0,77$ und $1,17$ sowie ein Minimum bei $x/L = 0,00$ erkennbar. Außer den Maxima wirkt auf den LKW ein negativer Auftrieb c_l bzw. ein Abtrieb.

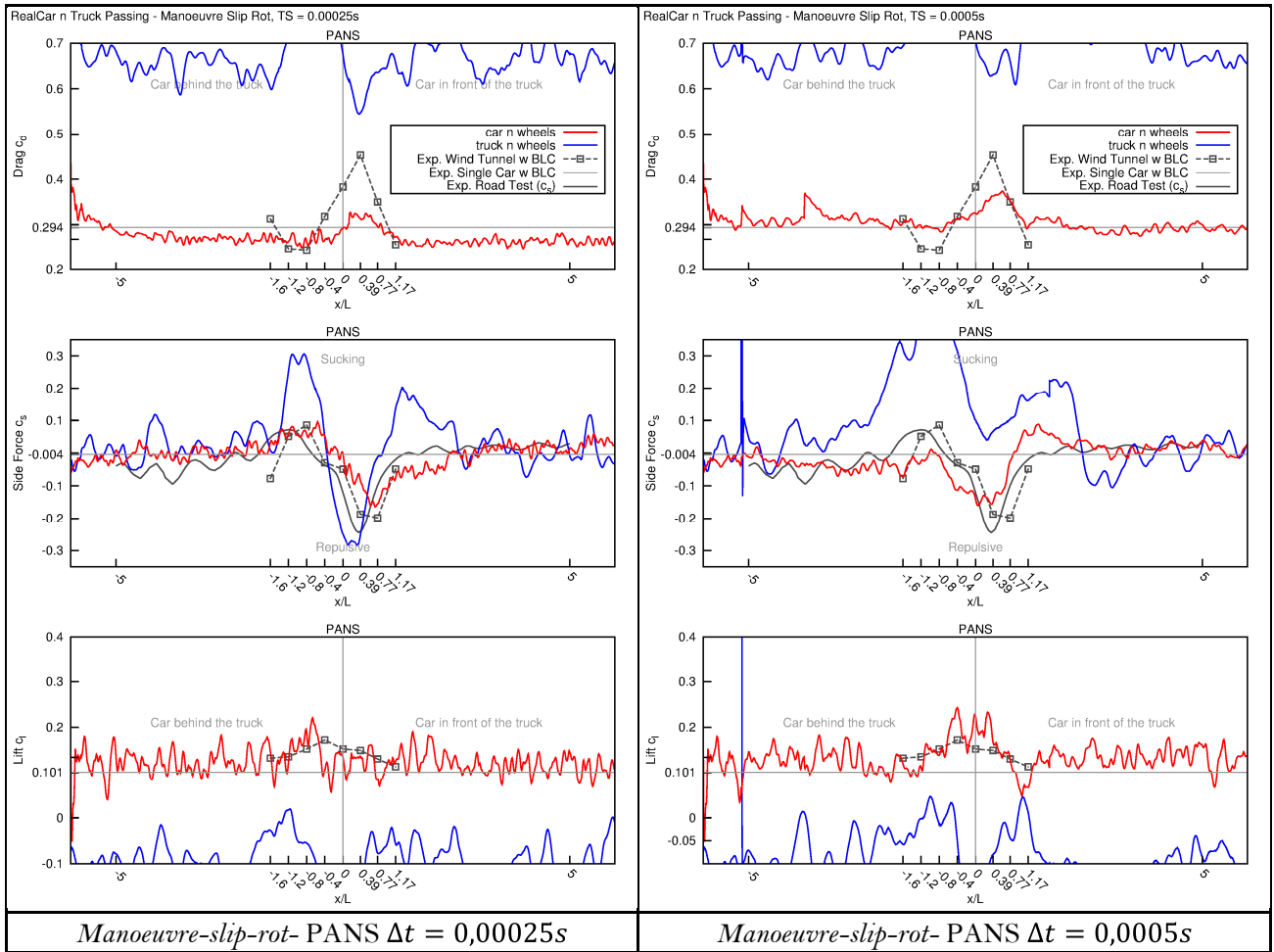


Bild 6.6: Vergleich der Verläufe des Luftwiderstands c_d , der Seitenkraft c_s , des Auftriebs c_l des PKWs (mit Rädern) und LKWs beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip*- Simulationen mit Rotation der Räder als Zeitschrittstudie.

Die Studie der zeitlichen Diskretisierung hat gezeigt, dass eine feinere Abstufung akkuratere Verläufe der Luftwiderstandsbeiwerte c_d , c_s und c_l liefert. Bei einem groben Zeitschritt werden die wirkenden Kräfte gedämpft. Andererseits können die Auswirkungen überschätzt werden. Ähnlich dessen können zwei Peakwerte in einen verschmolzen werden. Je kleiner der Zeitschritt, desto feinere Oszillationen der Luftwiderstandsbeiwerte können abgebildet werden. Als Ergebnis zeigt sich für die Simulation *slip* PANS der Zeitschritt $\Delta t = 0,0005s$ als ungeeignet. Der Verlauf der Luftwiderstandsbeiwerte bei der Simulation mit dem kleinsten Zeitschritt $\Delta t = 0,0001s$ wird als der genaueste angesehen. Bei der Simulation mit dem Zeitschritt $\Delta t = 0,00025s$ treten keine großen Abweichungen sowohl von der Simulation $\Delta t = 0,0001s$ als auch von den experimentellen Werten der Straßenmessung auf. In Hinblick auf die Rechendauer erweist sich der Zeitschritt $\Delta t = 0,00025s$ als ausreichend.

Anschließend werden die Momentenbeiwerte c_{M_x} , c_{M_y} und c_{M_z} auf die selbe Weise wie die Luftwiderstandsbeiwerte beschrieben. Die Bilder Bild 6.7 und Bild 6.8 zeigen wieder einen Vergleich zwischen den *slip* und *move* Varianten von den URANS und PANS Simulationen. Trotz des feinen Zeitschrittes $\Delta t = 0,0001s$ bei der *slip* URANS Simulation kann der Anstieg des PKW-Rollmoments c_{M_x} bei den Positionen $x/L = -1,20$ und $-0,80$ nicht ausreichend abgebildet werden. Bei der *move* URANS Simulation mit $\Delta t = 0,0005s$ gibt es eine gute Übereinstimmung mit den vorhandenen experimentellen Daten aus der Messung im Windkanal. Das Rollmoment c_{M_x} des PKWs bei der *slip* PANS Simulation mit feinem $\Delta t = 0,0001s$ folgt am Anfang dem experimentellen Wert des Solofahrzeugs; bei der Überholung stimmt er gut mit den Werten der experimentellen Messung in einzelnen Positionen überein. Bei der *move* PANS Simulation mit $\Delta t = 0,00025s$ ist der Überschlag des PKW-Rollmoments c_{M_x} nicht kräftig genug und es entsteht kein negatives PKW-Rollmoment c_{M_x} bei den Positionen $x/L = 0,39$ und $0,77$. Erst später in den vorderen Positionen kommt es zu einem negativen Rollmoment c_{M_x} des PKWs, was aber im Gegensatz zu den anderen Simulationen steht. Was

den Verlauf des PKW-Nickmoments c_{M_y} angeht, so zeigt die Variante *slip* eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment. Die URANS Simulation stimmt gut mit dem experimentellen Wert des Solofahrzeugs überein, erreicht aber das Maximum mit großen Schwankungen. Im Gegensatz dazu zeigt die *slip* PANS Simulation in den hinteren Positionen ein stärkeres negatives Nickmoment c_{M_y} des PKWs gegenüber dem Solofahrzeug und liefert einen ausgeprägteren An- und Abstieg während der Überholung, die besser mit den experimentellen Werten übereinstimmen. Das PKW-Nickmoment c_{M_y} der *move* Variante kann sowohl bei URANS als auch bei PANS dem Verlauf der experimentellen Werte während der Überholung gar nicht folgen. Bei der *move* PANS Simulation ist nur ein leichter Anstieg bei der Position $x/L = 0,39$ erkennbar. Für das Giermoment c_{M_z} des PKWs wird bei *slip* URANS und PANS eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Daten erreicht. Die *move* Variante zeigt ein schwaches Maximum in der Position $x/L = 1,20$ bei der URANS Simulation und ein stärkeres negatives PKW-Giermoment c_{M_z} während der Überholung bei PANS.

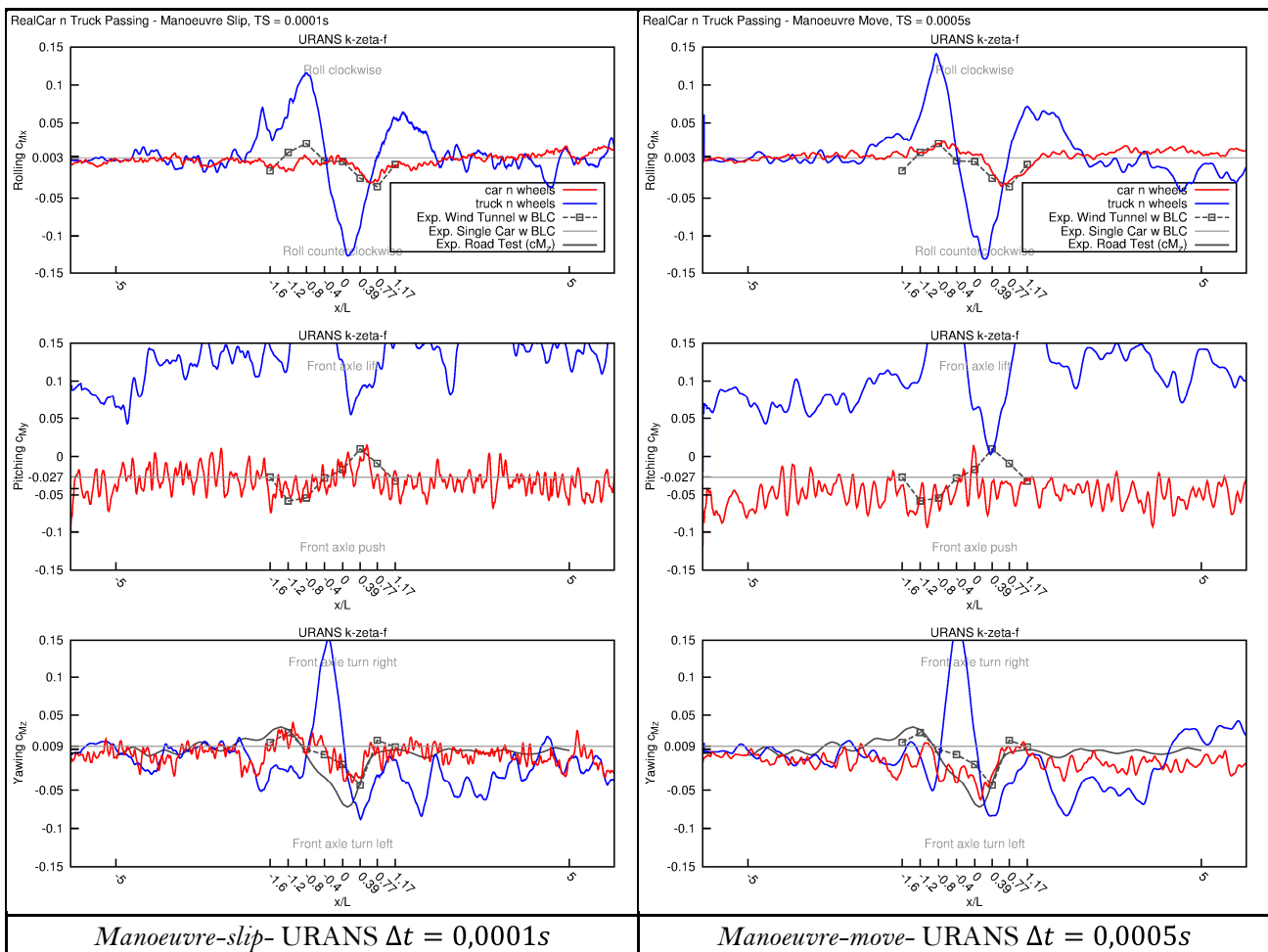


Bild 6.7: Vergleich der Verläufe des Rollmomentbeiwerts c_{M_x} , Nickmomentbeiwerts c_{M_y} , des Giermomentbeiwerts c_{M_z} des PKWs (mit Rädern) und LKWs beim URANS Verfahren der *Manoeuvre-slip*- / *move*-Simulationen ohne Rotation der Räder.

Nun bei dem Vergleich zwischen URANS und PANS zeigt die *slip* Variante für das Rollmoment c_{M_x} des PKWs bei URANS eine Abweichung bei dem Maximalwert. Das gleiche gilt für das PKW-Nickmoment c_{M_y} der URANS Simulation. Die PANS Simulation liefert bei dem PKW-Rollmoment c_{M_x} und dem Nickmoment c_{M_y} einen deutlichen Anstieg und ein Maximum, das dem experimentellen Wert entspricht. Der Verlauf des PKW-Giermoments c_{M_z} bietet sowohl bei URANS als auch bei PANS eine gute Übereinstimmung mit der Kurve des Giermoments c_{M_z} , die bei der Straßenmessung aufgenommen wurde. Dabei ist der Verlauf der PANS Simulation mehr akkurat als bei URANS.

Bei der *move* Variante liefert die URANS Simulation mit dem größeren Zeitschritt von $\Delta t = 0,0005s$ überraschenderweise bessere Ergebnisse als die PANS Simulation mit einem feineren Zeitschritt von $\Delta t =$

0,00025s. Das PKW-Rollmoment c_{M_x} der URANS Simulation folgt dem Verlauf der Messdaten. Bei PANS findet bei dem Rollmoment c_{M_x} des PKWs kein Überschlag auf einen negativen Wert statt und der Minimalwert ist nicht niedrig genug. Die Variante *move* schafft es nicht, das PKW-Nickmoment c_{M_y} richtig abzubilden. Bei URANS und PANS wirkt ein stärkeres PKW-Nickmoment c_{M_y} als das Experiment mit dem Solofahrzeug zeigt. Während der Überholung zeigt URANS den Anstieg nur durch einen Peak, wobei PANS leicht erhöhte Werte bringt. Das Giermoment c_{M_z} des PKWs wird bei URANS und PANS überschätzt. Der Umschlag des PKW-Giermoments c_{M_z} bei der Überholung gelingt der URANS Simulation besser; PANS schafft den steilen Anstieg nicht. Der Wert steigt erst langsam an, was auch im Fall des PKW-Rollmoments c_{M_x} als falsches Verhalten ausgewertet wurde.

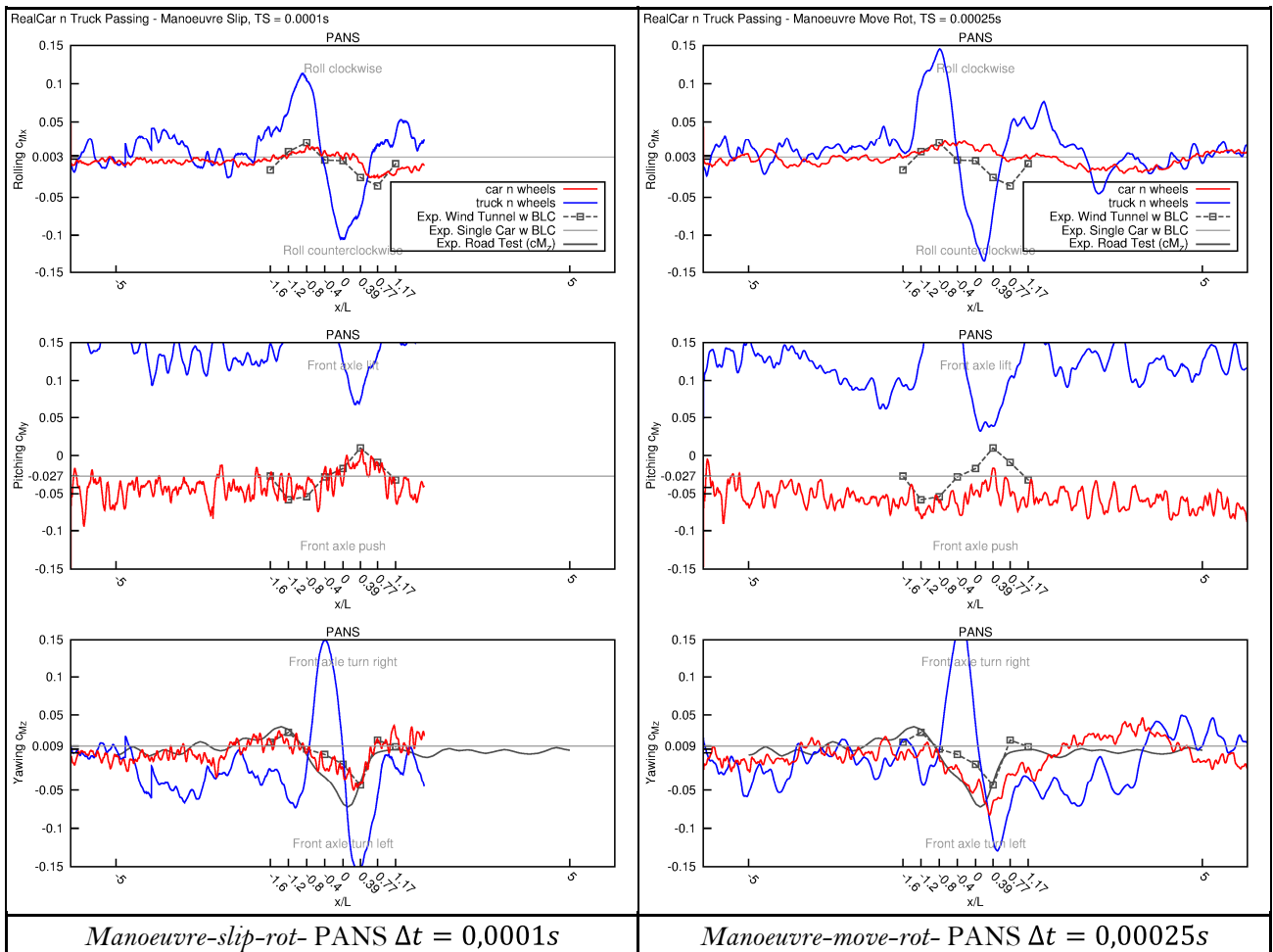


Bild 6.8: Vergleich der Verläufe des Rollmomentbeiwerts c_{M_x} , Nickmomentbeiwerts c_{M_y} , des Giermomentbeiwerts c_{M_z} des PKWs (mit Rädern) und LKWs beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip- / move-* Simulationen mit Rotation der Räder.

Als Letztes wird die Studie der zeitlichen Diskretisierung aus Sicht der Momentbeiwerte ausgewertet. Dazu dienen die Bilder Bild 6.8 und Bild 6.9. Dort werden die Verläufe der Momentbeiwerte c_{M_x} , c_{M_y} und c_{M_z} von *slip* PANS Simulationen mit den Zeitschritten von $\Delta t = 0,0001s$, $\Delta t = 0,00025s$ und $\Delta t = 0,0005s$ aufgetragen. Genau wie die wirkenden Kräfte werden auch die wirkenden Momente bei der Simulation mit dem größten Zeitschritt von $\Delta t = 0,0005s$ stark gedämpft. Der Anstieg des PKW-Rollmoments c_{M_x} bei der Positionen $x/L = -1,20; -0,80$ ist nicht gegeben. Es findet kein richtiger Umschlag des PKW-Rollmoments c_{M_x} statt. Stattdessen folgt nach einer leichten Absenkung ein übertriebener Anstieg. Die Dämpfung zeigt sich auch bei dem Verlauf des PKW-Nickmoments c_{M_y} . Bei dieser Simulation wird das PKW-Nickmoment c_{M_y} am größten übertrieben und reagiert nur mit einzelnen Peaks auf die Erhöhung während der Überholung. Zum Schluss wird bei dem Verlauf des PKW-Giermoments c_{M_z} das Maximum über die Position $x/L = -1,20$ fälschlicherweise länger angehalten. Der Überschlag des PKW-Giermoments c_{M_z} wird zwar korrekt erfasst, aber der steile Wiederanstieg wird nicht angehalten, sondern gedämpft und steigt nur langsam an. Unter der

Annahme, dass die Simulation mit dem feinsten Zeitschritt die genauesten Ergebnisse liefert, wird bei der PANS Simulation mit $\Delta t = 0,0005s$ das LKW-Rollmoment c_{M_x} deutlich überschätzt. Sein Maximum findet korrekterweise bei der Position $x/L = -0,80$ statt; der Umschlag ist wieder gedämpft und nicht kräftig genug. Das Minimum findet richtigerweise zwischen den Positionen $x/L = 0,00$ und $0,39$ statt; das Rollmoment c_{M_x} des LKWs erreicht aber nicht die negativen Werte und steigt wieder an. Der Verlauf des LKW-Nickmoments c_{M_y} wird bei der Simulation mit dem größten Zeitschritt qualitativ gut abgebildet und zeichnet sich, wie bei den anderen Simulationen mit feineren Zeitschritten, durch zwei lokale Maxima bei den Positionen $x/L = -0,80$ und $1,17$ und durch ein Minimum bei $x/L = 0,00$ aus. Das gleiche gilt auch für den Verlauf des LKW-Giermoments c_{M_z} , das bei allen drei Simulationen sein Maximum bei der Position $x/L = -0,40$ und zwei lokale Minima bei $x/L = -1,20$ und $0,39$ hat. Bei weiterer Betrachtung der restlichen Simulationen mit feineren Zeitschritten von $\Delta t = 0,00025s$ und $\Delta t = 0,0001s$ erzielt das Rollmoment c_{M_x} des PKWs eine gute Übereinstimmung mit der experimentellen Untersuchung des Solowagens und des Überholvorgangs im Windkanal. Dabei ist das Maximum des PKW-Rollmoments c_{M_x} bei der Position $x/L = -0,80$ bei dem Zeitschritt $\Delta t = 0,00025s$ nur leicht versetzt und der Knick, der das Rollmoment c_{M_x} bei den Positionen $x/L = -0,40$ und $0,00$ macht, wird durch die Simulation mit $\Delta t = 0,0001s$ besser erfasst. Der Umschlag folgt bei beiden Simulationen den experimentellen Werten und das Minimum findet ebenfalls in Übereinstimmung mit dem Experiment bei der Position $x/L = 0,77$ statt. In beiden Fällen folgt dann ein langsamer Anstieg. Im Vergleich zur Simulation mit $\Delta t = 0,0005s$ ist das Nickmoment c_{M_y} des PKWs bei den Simulationen mit $\Delta t = 0,00025s$ und $\Delta t = 0,0001s$ weniger überschätzt und sein Verlauf gleicht mehr dem experimentellen Wert des Solowagens. Bei beiden Simulationen wird bei dem Minimum bei den Positionen $x/L = -1,20$ und $-0,80$ eine leichte Absenkung angedeutet. Der Anstieg des PKW-Nickmoments c_{M_y} wird besser von der Simulation mit $\Delta t = 0,0001s$ erfasst. Dabei wird sein Maximum bei $x/L = 0,39$ erreicht, was wiederum dem Experiment entspricht. Bei der Simulation mit $\Delta t = 0,00025s$ wird das erhöhte Nickmoment c_{M_y} des PKWs immer leicht gedämpft und der Anstieg wird nur durch einzelne Peaks abgebildet. Ein ähnliches Verhalten zeigt auch das Giermoment c_{M_z} des PKWs. Bei $\Delta t = 0,00025s$ wird das Maximum des PKW-Giermoment c_{M_z} leicht gedämpft und der Umschlag ungenau abgebildet. Im Gegensatz dazu wird bei der Simulation mit dem feinsten Zeitschritt $\Delta t = 0,0001s$ das Maximum bei $x/L = -1,20$ erreicht. Der Umschlag ist zu der Kurve aus der Straßenmessung leicht versetzt und verfolgt, wie bereits erwähnt, wegen der kürzeren LKW-Länge die experimentellen Messpunkte aus dem Windkanal. Das Minimum wird bei beiden Simulationen in Übereinstimmung mit dem Experiment bei der Position $x/L = 0,39$ erreicht. Danach folgt ein steiler Anstieg des PKW-Giermoments c_{M_z} , was wiederum mit der Straßenmessung übereinstimmt. Ein zweites Maximum entsteht zwischen den Positionen $x/L = 0,77$ und $1,17$; danach sinkt das PKW-Giermoment c_{M_z} wieder.

Durch die Zeitschrittverkleinerung ändern sich bei den Momentbeiwerten c_{M_x} , c_{M_y} und c_{M_z} , die auf den LKW wirken, nur die Stärke der Maxima und Minima aber nicht deren Position. Im Vergleich zu der Simulation mit $\Delta t = 0,0005s$ überschlägt sich das LKW-Rollmoment c_{M_x} bei den Simulationen mit $\Delta t = 0,00025s$ und $\Delta t = 0,0001s$ in negative Werte. Die Position $x/L = -0,80$ für das Maximum und die Positionen $x/L = 0,00$; $0,39$ für das Minimum bleiben unverändert. Ein zweites Maximum wird ähnlich nach der Position $x/L = 1,17$ erreicht. Die Verläufe des LKW-Nickmoments c_{M_y} und Giermoments c_{M_z} bei den Simulationen mit $\Delta t = 0,00025s$ und $\Delta t = 0,0001s$ unterscheiden sich nicht stark von dem Verlauf der Simulation mit $\Delta t = 0,0005s$. Der Verlauf des LKW-Nickmoments c_{M_y} und der Verlauf des LKW-Giermoments c_{M_z} zeichnen sich durch zwei lokale Maxima bei den Positionen $x/L = -0,80$ und $1,17$ und durch ein Minimum bei $x/L = 0,00$ bzw. durch ein Maximum bei der Position $x/L = -0,40$ und durch zwei lokale Minima bei $x/L = -1,20$ und $0,39$ aus.

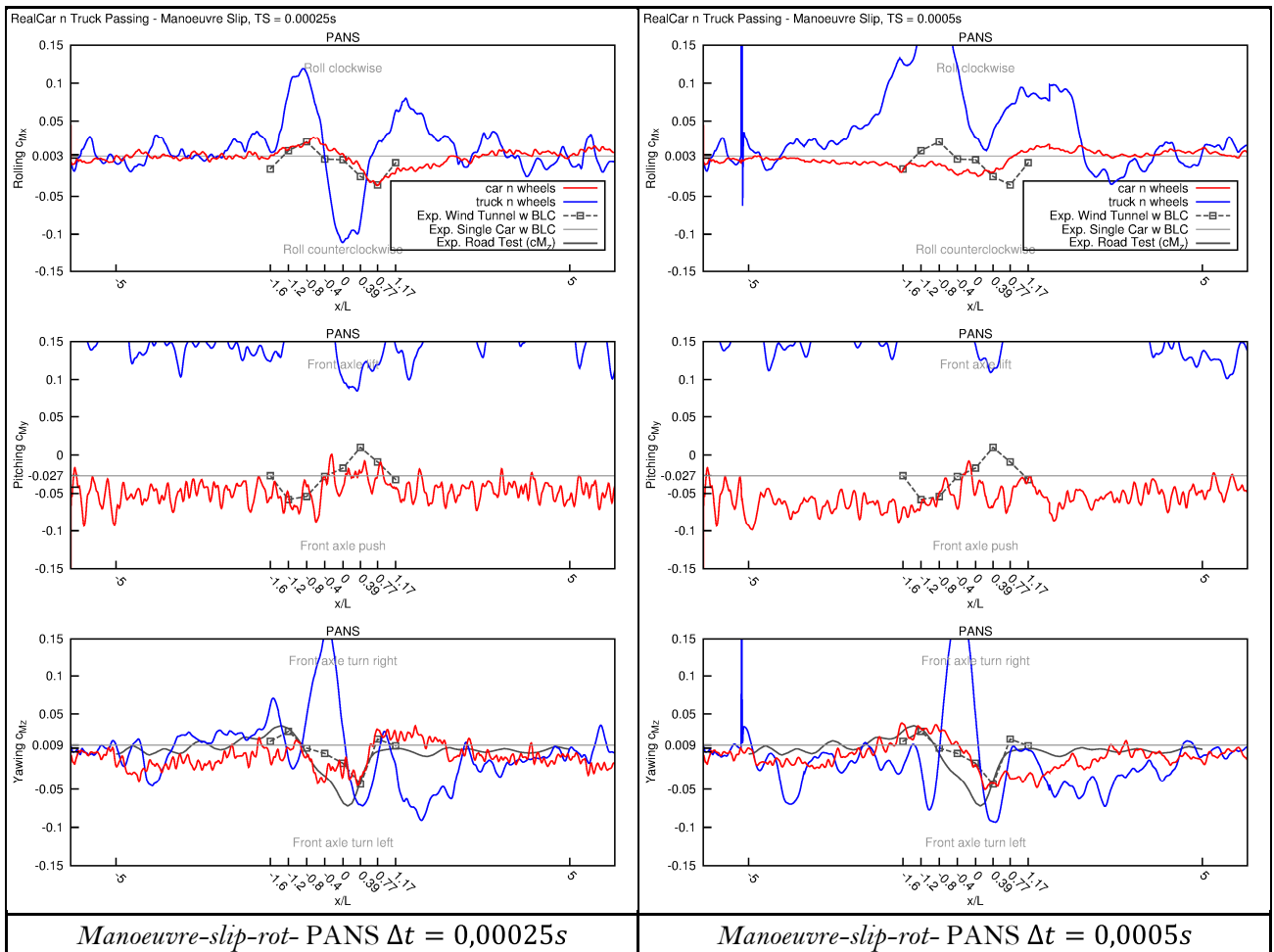


Bild 6.9: Vergleich der Verläufe des Rollmomentbeiwerts c_{M_x} , Nickmomentbeiwerts c_{M_y} , des Giermomentbeiwerts c_{M_z} des PKWs (mit Rädern) und LKWs beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip-rot* Simulationen mit Rotation der Räder als Zeitschrittstudie.

Nach der Auswertung der Momentenbeiwerte c_{M_x} , c_{M_y} und c_{M_z} im Rahmen der Studie der zeitlichen Diskretisierung hat sich bestätigt, dass ein grober Zeitschritt zur Dämpfung der wirkenden Momente führen kann. Die Verläufe der Momentbeiwerte bei der Simulation *slip* PANS mit dem Zeitschritt $\Delta t = 0,0005s$ sind von diesem Effekt stark betroffen; deswegen zeigt sich weiterhin der Zeitschritt $\Delta t = 0,0005s$ weiterhin als ungeeignet. Bei dem halbierten Zeitschritt von $\Delta t = 0,00025s$ sind vor allem bei dem Nickmoment c_{M_y} und dem Giermoment c_{M_z} immer leichte Verschmierungen der Verläufe aufgetreten. Für eine akkurate Bestimmung der Momentbeiwerte ist an dieser Stelle der feinste Zeitschritt $\Delta t = 0,0001s$ zu empfehlen. Weil im Fokus der Fahrzeugaerodynamik immerhin die Luftwiderstandsbeiwerte vor den Momentbeiwerten stehen, wird in dieser Studie als Kompromiss zwischen Rechendauer und Genauigkeit der Luftwiderstands- und Momentbeiwerte der Zeitschritt $\Delta t = 0,00025s$ gewählt, bei dem die Luftwiderstandsbeiwerte bereits ein gutes Ergebnis liefern.

Nach dem Vergleich der Luftwiderstands- und Momentbeiwerte zwischen den *slip* und *move* Varianten und den URANS und PANS Verfahren, wurde die Variante *slip* und das PANS Simulationsverfahren bevorzugt. Die Studie der zeitlichen Diskretisierung, die anhand der Simulation *slip-rot- PANS* durchgeführt wurde, hat gezeigt, dass der feinste Zeitschritt $\Delta t = 0,0001s$ die akkuratesten Verläufe der Luftwiderstands- und Momentbeiwerte hervorbringt. Der Überholvorgang wird also aus Sicht der auf den PKW und LKW wirkenden Kräfte und Momente anhand der Simulation *slip-rot-PANS_0001* (siehe Bilder Bild 6.5, Bild 6.8 links) beschrieben: Am Anfang des Manövers startet der PKW mit einer Geschwindigkeit von $55,555 m/s$. Durch die Gitterbewegung bewegt er sich seit dem ersten Zeitschritt mit einer doppelten Geschwindigkeit. Die PKW-Umströmung reagiert am Anfang mit einem erhöhten Luftwiderstand c_d und einem erhöhten Auftrieb c_l ; dabei wird durch das größere negative Nickmoment c_{M_y} die Hinterachse entlastet. Die PKW-Umströmung entwickelt sich für die Geschwindigkeit von $111,11 m/s$ und der Luftwiderstand c_d stabilisiert sich bei der Position $x/L = -5,00$ auf einen Wert, der niedriger als der experimentelle Wert eines Solofahrzeugs aus dem Windkanal mit

BLC ist. Der Luftwiderstand bei der PANS Simulation eines Solofahrzeugs *RealCar_Calculation4 Wheels-BLC-PANS* ist $c_d = 0,264$. Bei dem Überholvorgang oszilliert der PKW-Luftwiderstand c_d nach der Position $x/L = -5,00$ um diesen Wert; je näher der PKW dem LKW kommt, desto mehr sinkt er. Auch der Auftrieb c_l stabilisiert sich und oszilliert nach der Position $x/L = -5,00$ um den Wert aus der Windkanalmessung mit *BLC* $c_l = 0,101$. Je mehr sich der PKW dem LKW-Nachlauf nähert, desto langsamer wird die Strömung unter dem PKW und der Auftrieb c_l steigt, bzw. sollte steigen. Dabei wird die Hinterachse durch das negative Nickmoment c_{M_y} kontinuierlich entlastet. Die Seitenkraft c_s wird bei der Position $x/L = -5,00$ negativ; der PKW wird durch die langsame Strömung in dem LKW-Nachlauf von dem LKW abgestoßen. Danach sinkt sie kontinuierlich, bis sie kurz vor der Position $x/L = -1,60$ einen Nullwert erreicht und das Vorzeichen ändert. Auf dieselbe Weise verhält sich das Rollmoment c_{M_x} . Weil es auf den Punkt, der auf der Fahrbahn liegt, bezogen ist, kippt der PKW bei einer negativen Seitenkraft gegen den Uhrzeigersinn. In Übereinstimmung mit der Straßenmessung wirkt zuerst an den PKW ein negatives Giermoment c_{M_z} ; der PKW giert dabei gegen den Uhrzeigersinn. Bei Annäherung an den LKW sinkt das PKW-Giermoment c_{M_z} und kurz vor der Position $x/L = -1,60$ überschlägt es sich.

Der PKW-Luftwiderstand c_d sinkt kontinuierlich weiter über die Positionen $x/L = -1,60$ und $x/L = -1,20$ wobei er bei $x/L = -0,80$ das Minimum erreicht. Dies wird bei der Simulation auch einigermaßen gut abgebildet. Bei diesen Positionen, bei denen der PKW sich im LKW-Totwasser befindet, wird der PKW-Luftwiderstand c_d durch dieses Unterdruckgebiet reduziert. Die Strömung in Fahrbahnnahe wird bei der Umströmung des LKW-Chassis verlangsamt. So steigt der PKW-Auftrieb c_l über die Positionen $x/L = -1,60$, $x/L = -1,20$ und $x/L = -0,80$ immer weiter an und erreicht bei $x/L = -0,40$, wo der PKW hinter den vorderen PKW-Rädern steht, sein Maximalwert. Wie schon bereits erwähnt, schafft es nicht jede Simulation den Anstieg des PKW-Auftriebs c_l vollständig abzubilden. Das Nickmoment c_{M_y} bleibt bei den Positionen $x/L = -1,60$, $x/L = -1,20$ und $x/L = -0,80$ negativ; die Hinterachse des PKWs wird weiterhin entlastet. Die Seitenkraft c_s des PKWs steigt in guter Übereinstimmung mit der Straßenmessung bei der Position $x/L = -1,60$. Der weitere Anstieg ist zu der Straßenmessung versetzt. Während die Seitenkraft c_s bei der Straßenmessung ihr Maximum bereits bei $x/L = -1,20$ erreicht, entspricht die Simulation mehr der Windkanalmessung, bei der die PKW-Seitenkraft c_s erst bei $x/L = -0,80$ ihr Maximum hat. Diese Versetzung ist auf die unterschiedlichen LKW-Längen zurückzuführen. Die positive PKW-Seitenkraft c_s bei den Positionen $x/L = -1,60$, $x/L = -1,20$ und $x/L = -0,80$ entsteht durch den Saugeffekt, den das LKW-Totwasser und die beschleunigte Kanalströmung zwischen beiden Fahrzeugen verursacht. Das Nickmoment c_{M_y} kopiert wieder die Seitenkraft c_s ; der PKW rollt bei den Positionen $x/L = -1,60$, $x/L = -1,20$ und $x/L = -0,80$ im Uhrzeigersinn. Das Giermoment c_{M_z} des PKWs hat bei der Position $x/L = -1,60$ eine steigende Tendenz und bei $x/L = -1,20$ erreicht es in Übereinstimmung mit der Straßenmessung das Maximum. Der Saugeffekt verursacht, dass in diesen Positionen mehr die Front angesaugt wird; der PKW giert im Uhrzeigersinn.

Nachdem der PKW das Totwassergebiet des LKWs verlässt, setzt sich immer mehr die Wirkung des LKW-Staugebietes durch. Dadurch steigt der PKW-Luftwiderstand c_d bei $x/L = -0,40$ und $x/L = 0,00$ und erreicht sein Maximum bei $x/L = 0,39$. Je mehr sich der PKW vor der LKW-Vorderachse befindet, desto kleiner wird die Wirkung der verlangsamteten Umströmung aus dem LKW-Chassis auf den PKW. Bei den Positionen $x/L = 0,00$ und $x/L = 0,39$ kommt es zu Wiederabsenkung des PKW-Auftriebs c_l . Die Wirkung des LKW-Staugebietes trägt auch zum Anstieg des PKW-Nickmoments c_{M_y} bei den Positionen $x/L = -0,40$ und $x/L = 0,00$ bei. Bei $x/L = -0,40$ ist es zwar noch negativ, nach $x/L = 0,00$ überschlägt es sich aber und wird positiv. Bei $x/L = 0,39$ wird dann die Vorderachse des PKWs maximal entlastet. Nachdem die Seitenkraft c_s des PKWs ihr Maximum bei $x/L = -0,80$ erreicht hat, sinkt sie durch die Wirkung des LKWs wieder. Nach $x/L = -0,40$ ändert sie ihr Vorzeichen und wird bei $x/L = 0,00$ negativ. Zwischen $x/L = 0,39$ und $x/L = 0,77$ wird der PKW von dem LKW am stärksten abgestoßen. Im Vergleich zu den beiden Experimenten ist die Absenkung weniger stark ausgeprägt und zudem wegen der LKW-Länge zu der Straßenmessung versetzt. Das PKW-Rollmoment c_{M_x} sinkt nach $x/L = -0,80$ wie die Seitenkraft c_s , unterscheidet sich aber von ihr bei $x/L = -0,40$ und $x/L = 0,00$, wo es fast gegen Null geht. Bei diesen Positionen befindet sich der PKW neben dem LKW und kippt nicht. Sobald sich die Front des PKWs vor dem LKW befindet, entsteht wegen dem LKW-Staugebiet bei $x/L = 0,39$ ein negatives Rollmoment c_{M_x} und der PKW kippt gegen den Uhrzeigersinn. Bei der Position $x/L = 0,77$ erreicht das PKW-Rollmoment c_{M_x} sein Minimum. Nach der Position $x/L = -1,20$

wirkt der Saugeffekt mehr auf die Mitte und auf das Heck des PKWs. Dadurch sinkt das Giermoment c_{M_z} und bei $x/L = -0,80$ überschlägt es sich. Weiter bei $x/L = -0,40$ und $x/L = 0,00$ entsteht auch durch die Wirkung des LKW-Staugebietes ein negatives Giermoment c_{M_z} , wodurch der PKW gegen den Uhrzeigersinn giert. Dabei ist der Simulationsverlauf zu der Straßenmessung wieder leicht versetzt und stimmt mehr mit der Windkanalmessung überein. Bei der Simulation wird das niedrigste Giermoment c_{M_z} des PKWs bei der Position $x/L = 0,39$ erreicht.

Je mehr sich jetzt der PKW vor dem LKW befindet, desto kleiner wird sein Luftwiderstand c_d wieder. Bei der Position $x/L = 0,77$ sinkt er und bei $x/L = 1,17$, wo der PKW schon komplett vor dem LKW steht, wird der PKW-Luftwiderstand c_d durch die Drückwirkung des LKW-Staugebietes auf das PKW Heck unter den Wert eines Solofahrzeugs abgesenkt. Mit wachsender Entfernung wird die Wirkung des Überdruckgebietes auf den PKW immer schwächer und der PKW-Luftwiderstand c_d gleicht sich wieder dem Wert eines Solofahrzeugs an. Der PKW-Auftrieb c_l sinkt bei den Positionen $x/L = 0,77$ und $x/L = 1,17$ weiter und gleicht sich ebenso an den Wert des Solofahrzeugs an. Nach kurzer Entlastung der Vorderachse bei $x/L = 0,39$ sinkt das PKW-Nickmoment c_{M_y} wieder. Bei $x/L = 0,77$ überschlägt es sich und bei $x/L = 1,17$ wird erneut die Hinterachse entlastet. Nach der Position $x/L = 1,17$ oszilliert das Nickmoment c_{M_y} um den Wert einer Solofahrzeugs. Nach der Position $x/L = 0,77$, in der die PKW-Seitenkraft c_s ihres Minimum hatte, wird die Auswirkung des Überdruckgebietes auf den PKW immer schwächer; die Seitenkraft c_s wird bei $x/L = 1,17$ wieder kleiner. Nach der Position $x/L = 1,17$ kommt es sowohl bei der Straßenmessung als auch bei der Simulation zu einem Anstieg. Der PKW wird in den vorderen Positionen zu dem LKW angesaugt. Auf dieselbe Weise wie die Seitenkraft c_s verhält sich das Rollmoment c_{M_x} des PKWs. Mit senkender Wirkung des Überdruckgebietes wird es bei der Position $x/L = 1,17$ kleiner. Sobald die Wirkung abklingt, überschlägt es sich und der PKW kippt in den vorderen Positionen im Uhrzeigersinn. Nach der Position $x/L = 0,39$ wirkt das Überdruckgebiet immer mehr auf die hintere PKW-Hälfte. Dadurch wird das Giermoment c_{M_z} kleiner, überschlägt sich und steigt an. Bei der Position $x/L = 1,17$ wirkt das Überdruckgebiet auf das PKW Heck am stärksten; damit entsteht ein lokales Maximum des Giermoments c_{M_z} und der PKW rollt im Uhrzeigersinn. Bei der Straßenmessung wird der positive Wert nicht erreicht. In den vorderen Positionen gleicht sich die Simulation an den experimentellen Verlauf an und liefert ein negatives Giermoment c_{M_z} . Dadurch giert der PKW gegen den Uhrzeigersinn.

Zum Schluss wird der Verlauf der Luftwiderstände und Momente des LKWs beschrieben. Die Staugebiete der beiden Fahrzeuge interferieren am stärksten wenn sich die Fahrzeugfront eines Fahrzeugs bei der Hälfte des anderen Fahrzeug befindet. Für den PKW war das die Position $x/L = 0,39$ und für den LKW ist das die Stelle zwischen $x/L = -0,80$ und $x/L = -0,40$. In dieser Position entsteht der größte LKW-Luftwiderstand c_d , was auch mit der PANS Simulation des statischen Überholvorgangs übereinstimmt. Nach dem Anstieg sinkt der Luftwiderstand c_d während der Überholung. Bei der Position $x/L = 0,39$, bei der der Luftwiderstand c_d des PKWs am höchsten ist, ist dieser beim LKW am niedrigsten. Eine Wechselwirkung der beiden Totwassergebiete findet bei diesem dynamischen Vorgang im Gegensatz zu dem statischen Überholvorgang nicht statt, sodass nur der PKW-Luftwiderstand c_d dank dem LKW-Totwasser in $x/L = -0,80$ am niedrigsten ist. Der Druck im Totwasser des schnelleren PKWs ist höher; die Absenkung des LKW-Luftwiderstandes c_d wird ausschließlich durch die Kanalströmung verursacht. Nachdem er das Minimum erreicht hat, kommt es zu einem Wiederanstieg. Die starken Oszillationen des Luftwiderstands c_d , während der LKW durch den PKW nicht gestört wird, sind auf die großen Ablösungen an den Kanten des Laderaums und der Fahrerkabine zurückzuführen. Wenn sich der PKW dem LKW nähert, steigt kontinuierlich der Auftrieb c_l des LKWs (Abtrieb sinkt). Bei der Position $x/L = -0,80$ wird die Strömung unter dem LKW durch das PKW-Staugebiet am stärksten verlangsamt; der LKW-Auftrieb c_l erreicht ein lokales Maximum. Bei den Positionen, bei denen die Fahrzeuge aneinander vorbei fahren, wird durch die so entstehende Kanalströmung zwischen denen die Strömung unter dem LKW beschleunigt; der LKW-Auftrieb c_l hat bei $x/L = 0,00$ sein Minimum (maximalen Abtrieb). Danach kommt es zu einem Wiederanstieg. Bei den Positionen $x/L = 0,77$ und $x/L = 1,17$ verlangsamt das Totwassergebiet des PKWs noch stärker als zuvor die Strömung unter dem LKW und der LKW-Auftrieb c_l erreicht zwischen diesen Positionen sein Maximum. Mit zunehmender Entfernung des PKWs sinkt die Auswirkung seines Nachlaufs auf den LKW; der LKW-Auftrieb c_l sinkt und kehrt wieder zu seinem ursprünglichen Wert. Aus dem Verlauf des LKW-Nickmoments c_{M_y} ist sichtbar, dass der PKW seine Auswirkung nur auf den vorderen Teil des LKWs hat. Bei der Position $x/L = -0,80$ wird die LKW-

Vorderachse durch das PKW-Staugebiet am stärksten entlastet; das Nickmoment c_{M_y} erreicht sein Maximum. Danach sorgt die Kanalströmung für eine schnellere Strömung unter der LKW-Vorderachse; bei $x/L = 0,00$ wird das LKW-Nickmoment c_{M_y} am niedrigsten. Es folgt ein Wiederanstieg; die Vorderachse wird bei der Position $x/L = 0,77$ durch die langsame Strömung aus dem PKW-Nachlauf wieder stärker entlastet; das LKW-Nickmoment c_{M_y} hat ein lokales Maximum. Danach stabilisiert sich das LKW-Nickmoment c_{M_y} wieder bei kontinuierlicher Entlastung der Vorderachse, was an der Form der Unterbodengeometrie liegt. Die LKW-Seitenkraft c_s verläuft ähnlich wie die Seitenkraft c_s des PKWs, verursacht aber einen umgekehrten Effekt. Bei der Position $x/L = -0,80$, bei der das PKW-Staugebiet auf den LKW am stärksten wirkt, und dieser dadurch am stärksten abgestoßen wird, erreicht die LKW-Seitenkraft c_s ihr Maximum. Nach dieser Position wird die Wirkung des PKW-Staugebietes abgeschwächt und es setzt sich die Wirkung der Kanalströmung durch. Dadurch wird dann der LKW zu dem PKW angesaugt und die LKW-Seitenkraft c_s hat bei $x/L = 0,00$ ihr Minimum. Wenn der PKW den LKW überholt, wirkt die langsamere Strömung in dem PKW-Nachlauf auf den LKW abstoßend. Wegen dem Bezugspunkt, der genau wie beim PKW auf der Fahrbahn liegt, folgt auch das LKW-Rollmoment c_{M_x} der LKW-Seitenkraft c_s . Beim Abstoßen kippt der LKW im Uhrzeigersinn; beim Ansaugen dann gegen den Uhrzeigersinn. Bei dem LKW-Giermoment c_{M_z} wirkt am Anfang der Überholung das PKW-Staugebiet auf das Heck des LKWs abstoßend; der LKW giert gegen Uhrzeigersinn und das Giermoment c_{M_z} erreicht bei der Position $x/L = -1,20$ ein lokales Minimum. Danach wandert das PKW-Staugebiet immer mehr nach vorne, bis sich das LKW-Giermoment c_{M_z} überschlägt und somit das PKW-Staugebiet auf die LKW-Front abstoßend wirkt. Dadurch steigt das Giermoment c_{M_z} und bei $x/L = -0,40$ giert der LKW am stärksten im Uhrzeigersinn. Nach dieser Position wird die Wirkung des PKW-Staugebietes immer schwächer und der LKW steht immer mehr unter dem Einfluss der Kanalströmung. Durch dieses Unterdruckgebiet, das sich zwischen den Fahrzeugen bildet, wird die LKW-Front immer stärker angesaugt. Am stärksten wird es bei $x/L = 0,39$, wo das Giermoment c_{M_z} sein Minimum erreicht und der LKW gegen den Uhrzeigersinn giert. Bei den nächsten Positionen $x/L = 0,77$ und $x/L = 1,17$ verkleinert sich das Giermoment c_{M_z} zunächst wieder, wird aber danach durch den PKW-Nachlauf erneut angeregt und bewirkt, dass überwiegend die LKW-Front von ihm abgestoßen wird. Bei den vorderen Positionen entsteht ein lokales Minimum des Giermoments c_{M_z} ; der LKW giert im Uhrzeigersinn.

Aus den Verläufen der Luftwiderstandsbeiwerte c_d , c_s und c_l sowie der Momentbeiwerte c_{M_x} , c_{M_y} und c_{M_z} wurde ersichtlich, dass bei dem Vergleich der Simulationsverfahren PANS und bei der Studie der zeitlichen Diskretisierung der Zeitschritt $\Delta t = 0,0001s$ die akkuratesten Ergebnisse und die beste Übereinstimmung mit den experimentellen Daten liefern. Für die weitere Auswertung werden deswegen ausschließlich PANS Simulationen in den beiden Versionen *slip* und *move* betrachtet, die mit Cases *Manoeuvre-slip-rot-PANS_0001* und *Manoeuvre-move-rot-PANS_00025* repräsentiert werden.

Bei der Auswertung des Druckwiderstandsbeiwerts c_p werden die Druckdifferenzen bei der Überholung auf den Druckwiderstandsbeiwert des Solofahrzeugs aus dem Kapitel 4 Umströmung eines realistischen Fahrzeuges (*RealCar*) bezogen. Dabei werden die Unterschiede zwischen *Manoeuvre-slip-rot-PANS_0001*, *Manoeuvre-move-rot-PANS_00025* und *RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-PANS* in acht Positionen des Überholvorgangs untersucht. Auf den Bildern Bild 6.10, Bild 6.11, Bild 6.12, Bild 6.13 und Bild 6.14 zeigt die graue Linie die experimentellen Druckbeiwerte eines Solofahrzeugs mit Grenzschichtabsaugung *BLC*. Daneben stellt die graue Fläche einen qualitativen Druckunterschied von dem experimentell gemessenen Überholvorgang ebenso mit Grenzschichtabsaugung *BLC* dar. Die farbige Linie zeigt die Druckbeiwerte aus der Simulation *RealCar_Calculation4-Wheels-BLC-PANS*. Auf diese Simulationsergebnisse sind die Druckunterschiede aus den Überholsimulationen *Manoeuvre-slip-rot-PANS_0001*, *Manoeuvre-move-rot-PANS_00025* und *RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-PANS* aus dem Kapitel 5 Quasi-stationärer PKW-LKW Überholvorgang (*RealCar and Truck*) bezogen und wieder qualitativ als farbige Flächen dargestellt. Damit bezieht sich die Skala auf den oben genannten Bildern nur auf die Linien, während die Flächen nur einer Verkleinerung bzw. einer Vergrößerung entsprechen.

Das Bild 6.10 zeigt die Messpunkte auf der Fahrzeugoberseite in zwei symmetrischen Ebenen $y = -0,16m$ und $y = 0,16m$. Bei den Messergebnissen in der hintersten Position $x/L = -1,60$ der Überholung werden im Vergleich zu dem Solofahrzeug nur kleine Unterdrücke beobachtet. Entlang dem ganzen Verlauf wird der Unterdruck bei der Simulation *-BLC-PANS* im Vergleich zum Experiment deutlich überschätzt. Der

Druckbeiwert bei der Simulation *-slip-PANS* stimmt fast mit dem Druckbeiwert der PANS Simulation des Solofahrzeugs überein. Die Simulation *-slip-PANS* zeigt bei dieser Position geringe Druckunterschiede. Die *-move-PANS* Simulation zeigt auf dem vorderen Teil einen stärkeren Überdruck zu dem Solofahrzeug, was den experimentellen Werten widerspricht. Auf der Heckscheibe und auf dem Kofferraumdeckel entsteht dann ein zu starker Unterdruck. Bei der Position $x/L = -1,20$, bei der der PKW neben dem LKW-Totwasser steht, steigt dadurch in dem vorderen Teil der Unterdruck. Dieser Unterdruckanstieg wird am besten von der Simulation *-BLC-PANS* erfasst. Die Simulation *-slip-PANS* zeigt einen Anstieg, der aber deutlich kleiner ausgeprägt ist. Der kleinere Druckunterschied in dem hinteren Teil entspricht besser dem Experiment. Die *-move-PANS* Simulation unterscheidet sich wieder durch einen Überdruck auf der Frontscheibe und auf dem Dach. Der Unterdruck auf der Heckscheibe und auf dem Kofferraumdeckel wird wieder überschätzt. Zu der Wirkung des LKW-Totwassers bei der nächsten Position $x/L = -0,80$, bei der der PKW zum Teil neben dem LKW steht, addiert sich die Wirkung der Kanalströmung; der Unterdruck wird stärker und weiter nach hinten verbreitet. Hier hat der Unterdruck bei *-BLC-PANS* wieder eine bessere Übereinstimmung als bei *-slip-PANS*. Die *-slip-PANS* Simulation schafft es aber, den höheren Unterdruck rechts als links abzubilden. Bei *-move-PANS* sinkt der Druck im Vergleich zur vorherigen Position, ist aber weiter durch einen starken Überdruck auf der Frontscheibe und einen Unterdruck auf der Heckscheibe geprägt. Diese Asymmetrie zwischen der rechten und der linken Seite vertieft sich bei der Position $x/L = -0,40$, bei der der PKW komplett neben dem LKW steht. Durch die Kanalströmung wird die Strömung zwischen beiden Fahrzeugen mehr beschleunigt als die Umströmung und somit wird der Unterdruck rechts größer als links. Die *-BLC-PANS* Simulation fängt an, den Unterdruck zu überschätzen, während die *-slip-PANS* Simulation sich dem experimentellen Verlauf immer mehr nähert. Auch bei *-move-PANS* sinkt der Druck weiter und in allen Messpunkten, außer dem auf der Frontscheibe, entsteht ein Unterdruck. Bei der nächsten Position $x/L = 0,00$ zeigt sich bei dem Experiment eine Wirkung des LKW-Staugebietes, wodurch der Unterdruck in dem vorderen Teil des PKWs wieder sinkt. Diese Tendenz wird bei den Simulationen nur auf der Motorhaube wiedergegeben; sonst steigen die Unterdrücke weiter. Bei *-BLC-PANS* wird der Unterdruck deutlich überschätzt; bei *-slip-PANS* kommt es zu einem geringeren Anstieg. Die Simulation *-move-PANS* zeigt ebenfalls nur eine Senkung auf der Motorhaube; sonst ist der Verlauf durch einen Unterdruckanstieg geprägt. Die Wirkung des LKW-Staugebietes wird immer stärker und bei der Position $x/L = 0,39$ verbreitet sie sich auf die vordere PKW-Hälfte, wo nun ein Überdruck herrscht. Die hintere Hälfte ist weiterhin durch einen Unterdruck geprägt. Der Überdruck wird auf der rechten Seite von *-BLC-PANS* besser getroffen und von *-slip-PANS* kleiner abgebildet. Der Überdruck ist bei *-move-PANS* weiterhin höher als bei *-slip-PANS*. Auf der linken Seite wird der Überdruck in der vorderen Hälfte nur durch *-BLC-PANS* abgebildet. Die Simulation *-slip-PANS* zeigt fast keinen Druckunterschied zum Solofahrzeug und *-move-PANS* liefert sogar immernoch einen Unterdruck. In dem hinteren Teil wird der Unterdruck von *-BLC-PANS* noch stärker überschätzt als bei der vorherigen Position. Der Unterdruck bei *-slip-PANS* zeigt eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment und bei *-move-PANS* entsteht auf der Heckscheibe ein großer Unterdruckanstieg. Die Druckverteilung rechts und links ist weiter asymmetrisch. Bei der Position $x/L = 0,77$ steht der PKW komplett vor dem LKW; das Überdruckgebiet breitet sich weiter nach hinten aus. Auf dem Dach entsteht der größte Überdruck. Die Simulation *-BLC-PANS* liefert die beste Übereinstimmung in dem Überdruckbereich. Der Unterdruck im Heck wird dabei noch überschätzt. Die *-slip-PANS* Simulation zeigt, was den Über- und Unterdruck angeht, deutlich kleinere Gradienten. Die *-move-PANS* Simulation zeigt dabei einen großen Überdruck auf der Frontscheibe und einen Unterdruck auf der Heckscheibe. Bei der letzten Position $x/L = 1,17$ entfernt sich der PKW von dem LKW; die Wirkung des LKW-Staugebietes sinkt, aber auf der Fahrzeugoberfläche verbreitet sich überall ein Überdruck. Je mehr sich das PKW- vor dem LKW-Modell befindet, desto mehr wirkt sich das LKW-Staugebiet durch einen Überdruck auf der Oberseite aus. Bei der Position $x/L = 0,77$ herrscht auf dem Dach der größte Überdruck. Im Heckbereich setzt sich noch ein Unterdruck durch, der die Strömungsbeschleunigung zwischen den beiden Fahrzeugmodellen darstellt. Bei der letzten Position $x/L = 1,17$ befindet sich die Fahrzeugoberseite komplett in einem Überdruckgebiet, wobei die Wirkung des LKW-Staugebietes in dem Frontbereich wieder langsam abklingt. Die Größe des Überdruckes wird wieder von *-BLC-PANS* am besten wiedergegeben. Die Simulationen *-slip-PANS* und *-move-PANS* zeigen deutlich kleinere Werte und im hinteren Bereich herrscht bei ihnen noch ein Unterdruck. Außerdem zeigt die Simulation *-move-PANS* auf der Motorhaube einen zu großen Überdruck.

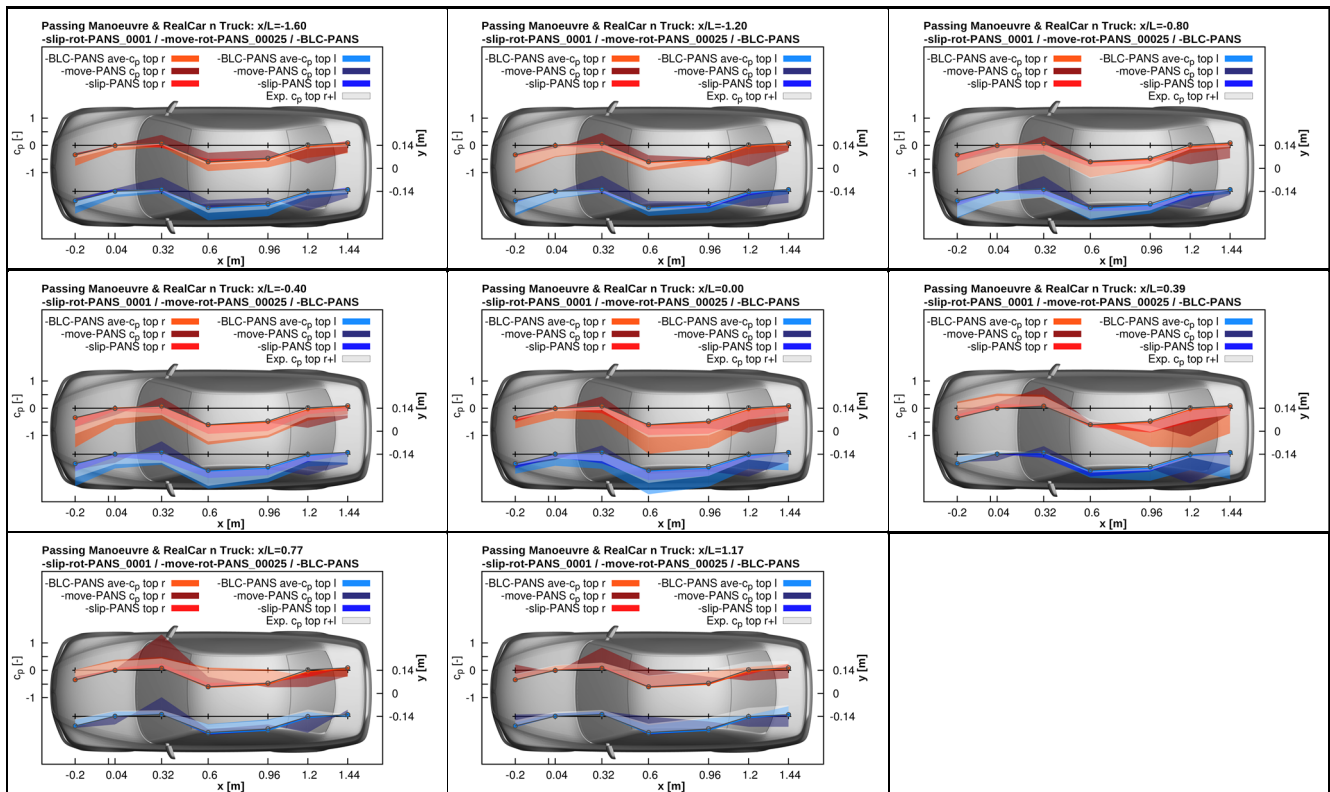


Bild 6.10: Die Druckveränderung bei der Überholung auf der Oberseite des PKWs beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip-rot- / move-rot- und RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-* Simulationen zum Solofahrzeug *RealCar_Calculation4-Wheels-BLC-* in allen Positionen.

Als Nächstes wird die Druckverteilung auf dem Unterboden untersucht. Das Bild 6.11 zeigt die Druckunterschiede in Bezug auf das Solofahrzeug in der Zentralebene $y = 0\text{m}$. Bei der ersten Position $x/L = -1,60$ ist bei dem Experiment der Druck in allen Messpunkten niedriger als bei dem Solofahrzeug. Nur die Simulation *-BLC-PANS* zeigt im Vergleich zum Solofahrzeug überall einen Unterdruck. Bei *-slip-PANS* herrscht bei dem Frontdiffusor zwar ein leichter Unterdruck, der sich aber später in einen Überdruck umwandelt. Auf der Tunnelbrücke und auf der Reserveradmulde entsteht wieder ein Unterdruck. Die *-move-PANS* Simulation ist ähnlich wie bei der Oberseite durch einen Überdruck geprägt. Nur auf der Tunnelbrücke entsteht ein starker Unterdruck. Nach dem Experiment wandelt sich der Unterdruck bei der Position $x/L = -1,20$ in dem hinteren Teil in einen Überdruck um. Die Ursache dafür stellt die Annäherung an das LKW-Totwasser dar, das die Strömung umleitet und somit in dem hinteren Bereich die Strömung langsamer wird. Dieses Verhalten können die Simulationen *-BLC-PANS* und *-slip-PANS* gut nachbilden. Bei *-move-PANS* entsteht eine Abweichung an der Reserveradmulde. Die Simulation zeigt überall einen Überdruck. Bei der nächsten Position $x/L = -0,80$, bei der der PKW teils neben dem LKW steht, verbreitet sich die Wirkung des LKW-Totwassers nach hinten. Mit Ausnahme der Reserveradmulde herrscht in allen Messpunkten ein Unterdruck. Bei den Simulationen *-BLC-PANS* und *-slip-PANS* steigt der Unterdruck bzw. sinkt bei *-move-PANS* der Überdruck auf dem Frontdiffusor. Auf der Tunnelbrücke entsteht bei *-slip-PANS* und bei *-move-PANS* ein zu starker Unterdruck und auf der Reserveradmulde zeigt *-move-PANS* umgekehrt zum Experiment einen Unterdruck. Bei der Position $x/L = -0,40$ steht der PKW bereits ganz neben dem LKW. Dort entsteht dank der Kanalströmung, die sich zwischen den beiden Fahrzeugen bildet, ein deutlicher Unterdruck auf dem Unterboden. Die Simulationen bilden ihn entsprechend nach, nur bei *-move-PANS* ist er zu klein ausgeprägt und so herrscht auf der Reserveradmulde noch ein Überdruck. Bei der nächsten Position $x/L = 0,00$ setzt sich auf dem Frontdiffusor die Wirkung des LKW-Staugebiets langsam durch. Laut Experiment entsteht in dem ersten Messpunkt ein kleiner Überdruck. Bei den Simulationen wird der Unterdruck im Vergleich zu der vorherigen Position zwar abgeschwächt, wandelt sich aber noch nicht in einen Überdruck um. Die Simulation *-slip-PANS* zeigt auf der Tunnelbrücke wieder einen zu großen Unterdruck. Wenn sich der PKW teilweise vor dem LKW befindet, was durch die Position $x/L = 0,39$ abgebildet wird, verstärkt sich die Wirkung des LKW-Staugebiets in der vorderen Fahrzeughälfte. Nun zeigen auch die Simulationen auf dem Frontdiffusor einen starken Überdruck. In dem hinteren Teil herrscht weiterhin noch ein Unterdruck, der bei *-move-PANS* auf der Tunnelbrücke stark überschätzt wird. Bei der nächsten Position $x/L = 0,77$ steht der PKW vor dem LKW und

somit verbreitet sich der Überdruck über den ganzen Unterboden. Die Verbreitung des Überdruckes zeigen auch die Simulationen, wobei bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* auf der Tunnelbrücke ein starker Unterdruck herrscht und *-slip-PANS* noch auf der Reserveradmulde einen Unterdruck zeigt. Mit zunehmender Entfernung des PKWs von dem LKW bei der Position $x/L = 1,17$ schwächt sich die Wirkung des LKW-Staugebietes wieder ab und der Überdruck sinkt. Die Simulationen zeigen auf dem Frontdiffusor einen stärkeren Druckabbau. Dadurch entsteht dort sogar ein Unterdruck. Auf der Reserveradmulde zeigen die Simulationen einen starken Überdruck.

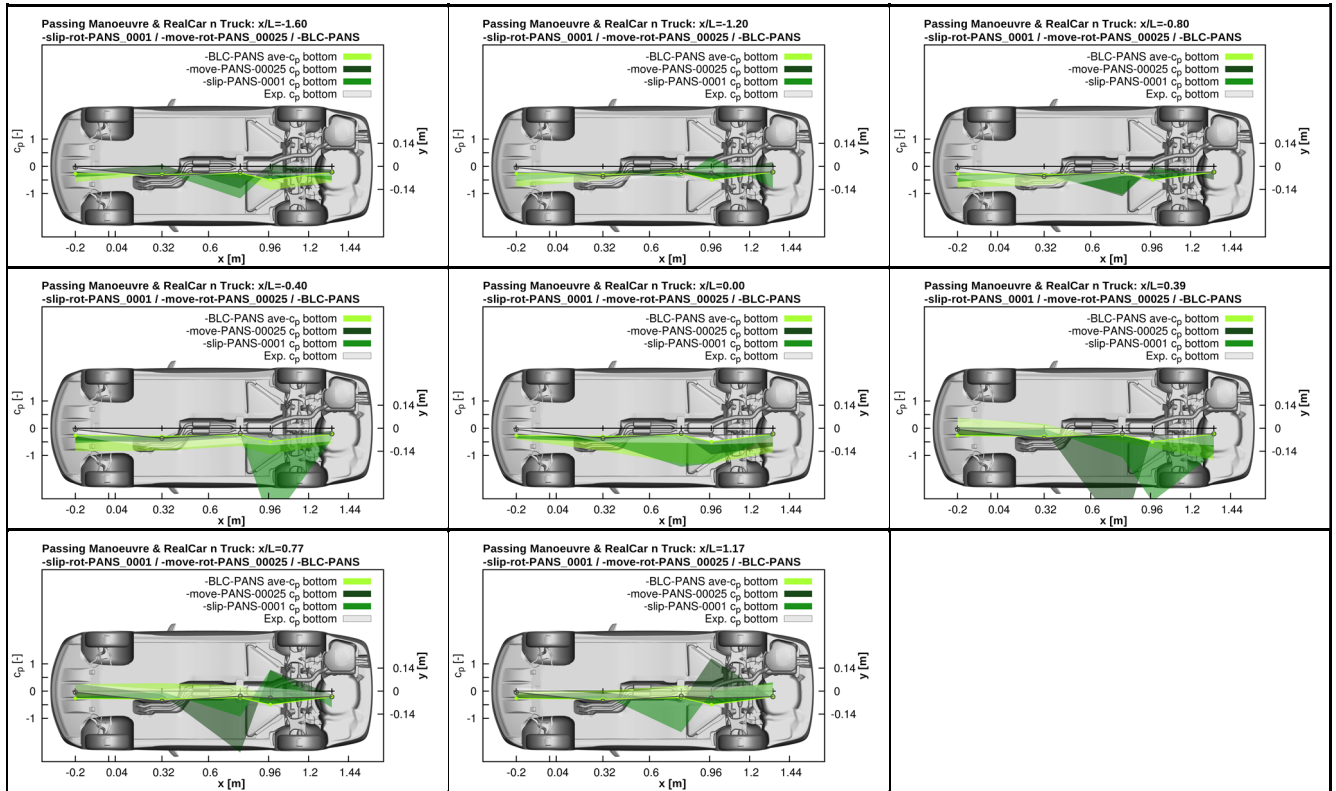


Bild 6.11: Die Druckveränderung bei der Überholung auf der Unterseite des PKWs beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-* und *RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-* Simulationen zum Solofahrzeug *RealCar_Calculation4-Wheels-BLC-* in allen Positionen.

Weiter werden die Druckdifferenzen in einem Messpunkt auf dem Bug, der auf der Zentralebene $y = 0m$ in einer Höhe von $z = 0,04m$ liegt, und in zwei Messpunkten im Heck, die sich links und rechts auf den Ebenen $y = -0,16m$ und $y = 0,16m$ in einer Höhe von $z = 0,16m$ befinden, untersucht (siehe Bild 6.12). Bei vereinzelt Messpunkten wird der experimentelle Wert durch einen grauen Kreis abgebildet. Der farbige Punkt stellt das Simulationsergebnis des Solofahrzeugs dar. Die vertikalen Linien zeigen dann die Druckdifferenz bei dem Überholvorgang. Bei der experimentellen Messung wurde der Referenzdruck, der für die Berechnung des Druckwiderstandsbeiwerts c_p nötig ist, sowohl bei dem Solofahrzeug als auch bei dem Überholvorgang im Windkanal in dem Punkt 33 auf dem Bug genommen. Aus diesem Grund zeigen in diesem Punkt die experimentellen Werte bei der Überholung keine Druckdifferenz zu dem Solofahrzeug. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass während des Überholvorgangs in diesem Punkt nicht zwangsläufig der Staupunkt mit $c_p = 1$ sein muss. Auf der Heckseite bei der Position $x/L = -1,60$ wird nach dem Experiment der Druck im Totwasser rechts größer als links, was von der Simulation des Solofahrzeugs umgekehrt wiedergegeben wurde. Betrachtet man weiter nur die Druckdifferenzen, entsteht in dieser Position im experimentellen Überholvorgang rechts ein größerer Unterdruck als links. Die Unterdruckdifferenz wird von *-BLC-PANS* umgekehrt wiedergegeben. Eine richtige Tendenz zeigt an dieser Stelle *-move-PANS*, während *-slip-PANS* fälschlicherweise einen Überdruck aufweist. Bei der nächsten Position $x/L = -1,20$ wird der PKW in Richtung LKW angesaugt. Dadurch vergrößert sich auf der rechten Seite der Unterdruck und auf der linken Seite überschlägt sich der Unterdruck in einen Überdruck. Dieser Überdruck links wird nur durch *-slip-PANS* wiedergegeben. Rechts zeigen *-slip-PANS* und *-move-PANS* im Vergleich zu *-BLC-PANS* einen wesentlich kleineren Unterdruck. Eine ähnliche Druckdifferenz herrscht auch bei der nächsten Position $x/L = -0,80$, bei der der PKW zum Teil neben dem LKW steht. Auf beiden Seiten, das heißt links und rechts, bringt *-slip-PANS*

die beste Übereinstimmung mit dem Experiment. Die Simulation *-BLC-PANS* zeigt links nur einen kleinen Überdruck und *-move-PANS* bildet umgekehrt links einen Unterdruck und rechts einen Überdruck. Wenn der PKW komplett neben dem LKW steht, was bei der Position $x/L = -0,40$ der Fall ist, ändert sich die Strömungsrichtung im Totwasser und links entsteht ein größerer Unterdruck als rechts. Diese Tendenz folgt am besten die Simulation *-BLC-PANS*. Die *-slip-PANS* und *-move-PANS* zeigen zwar einen Unterdruck aber mit umgekehrter Druckdifferenz. Diese Druckverteilung im Totwasser herrscht auch bei den nächsten zwei Positionen während sich der Unterdruck kontinuierlich erhöht. Der größere Unterdruck links als rechts wird nur durch *-BLC-PANS* wiedergegeben. Die beiden Simulationen *-slip-PANS* und *-move-PANS* mit bewegendem Gitter weisen eine umgekehrte Tendenz auf und somit eine umgekehrte Strömungsrichtung im Totwasser. Bei der Position $x/L = 0,00$ entsteht bei *-slip-PANS* links sogar ein Überdruck. Bei der Position $x/L = 0,39$ hat die Druckdifferenz bei *-slip-PANS* wieder eine ähnliche Tendenz wie das Experiment. Die deutlich kleineren Unterdrücke bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* als bei *-BLC-PANS* entsprechen dem kleineren Luftwiderstand c_d bei diesen Simulationen. Bei der Position $x/L = 0,77$ setzt sich die Wirkung des LKW-Staugebietes auch im Totwasser durch. Die Unterdrücke reduzieren sich deutlich. Sie werden auf beiden Seiten nur durch *-BLC-PANS* gut getroffen. Die Simulationen *-slip-PANS* und *-move-PANS* zeigen rechts schon einen Überdruck. Bei der Position $x/L = 1,17$ trifft das LKW-Staugebiet von hinten auf den PKW. Im Totwasser entsteht an beiden Seiten ein Überdruck. Weil die Strömung, die sich zwischen beiden Fahrzeugen befindet, beschleunigt wird, entsteht links ein größerer Überdruck als rechts. Dies wird nur durch *-BLC-PANS* ähnlich abgebildet. Die Simulationen *-slip-PANS* und *-move-PANS* weisen rechts einen größeren Überdruck und links sogar einen leichten Unterdruck auf. Dadurch entsteht bei diesen Simulationen im Totwasser eine andere Strömung.

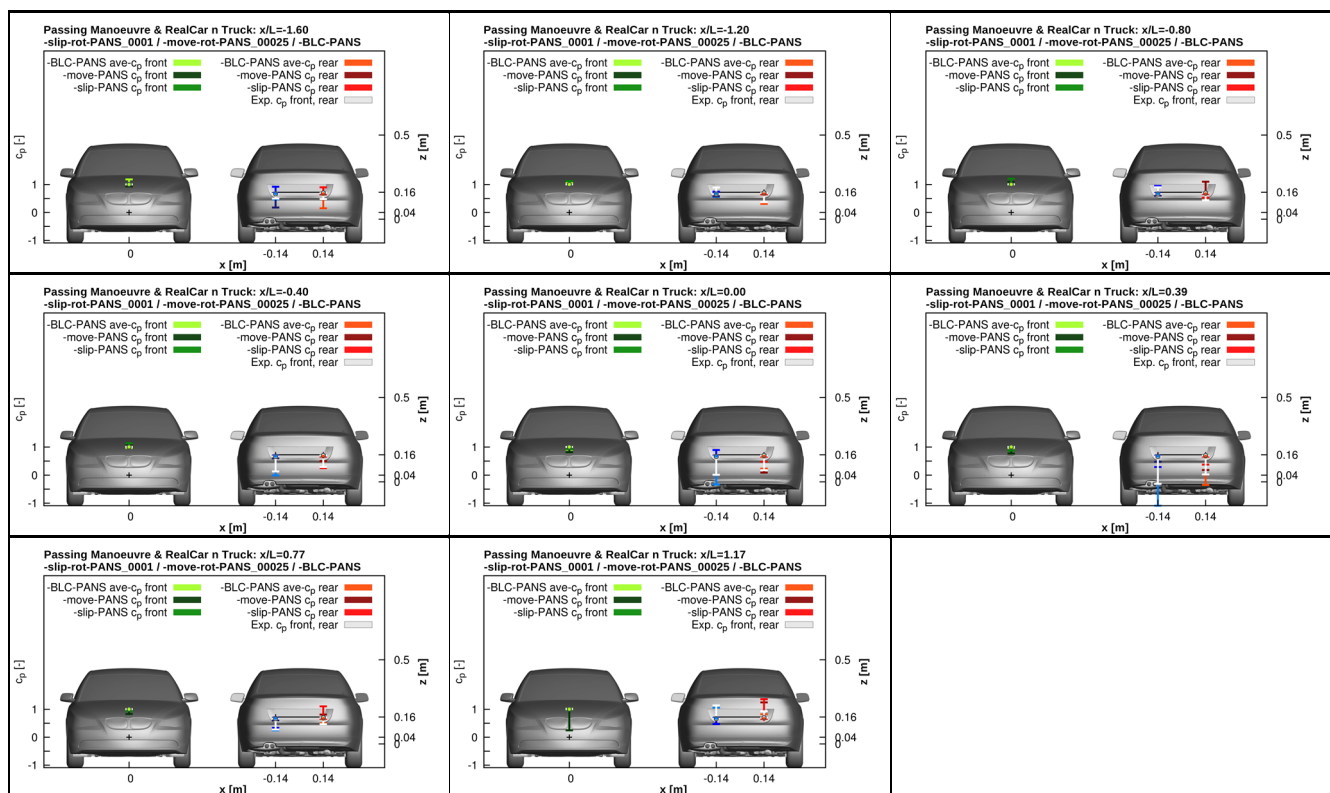
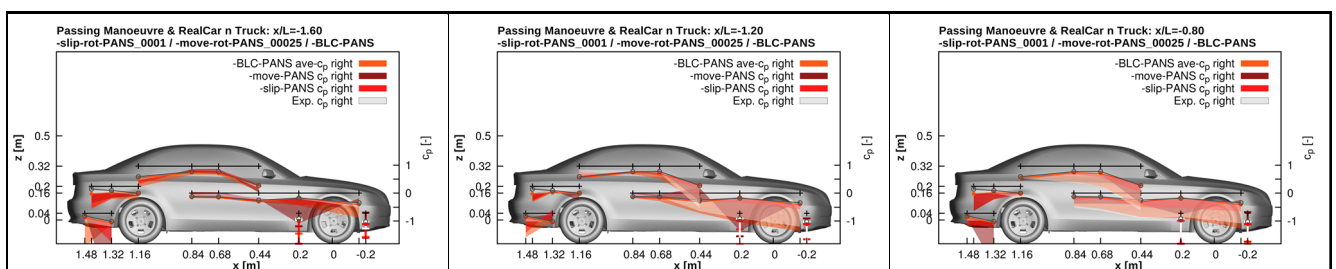


Bild 6.12: Die Druckveränderung bei der Überholung am Bug und am Heck des PKWs beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip-rot- / move-rot- und RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-* Simulationen zum Solofahrzeug *RealCar_Calculation4-Wheels-BLC-* in allen Positionen.

Die Druckverteilung wird an den Fahrzeugseiten in Messpunkten ausgewertet, die auf vier horizontalen Ebenen $z = 0,04m$, $z = 0,16m$, $z = 0,2m$ und $z = 0,32m$ verteilt sind. Das Bild 6.13 zeigt die Druckdifferenzen zwischen der Überholung und dem Solofahrzeug auf der rechten Fahrzeugseite. Beginnt man wieder mit der Position $x/L = -1,60$, entsteht hier nach dem Experiment bei abgerundeten Flächen mit kleinerem Radius ein Unterdruck, und auf geraden Flächen ein Überdruck. Die *-BLC-PANS* überschätzt den Unterdruck in dem vorderen und hinteren Bereich. Die Umwandlung des Unterdruckes in einen Überdruck auf den geraden Flächen bilden die Simulationen *-slip-PANS* und *-move-PANS* besser ab. Bei *-slip-PANS* entstehen bei dem

Vorderrad zu große Unterdrücke. Umgekehrt zeigt die *-move-PANS* auf der Front einen Überdruck. Die Strömung am Heck wird bei allen drei Simulationen stärker beschleunigt. Wenn sich der PKW dem LKW nähert, entsteht von dem LKW-Totwasser ein Saugeffekt. Bei der Position $x/L = -1,20$ entsteht dadurch vorne ein Unterdruck. Die Strömung wird umgelenkt und dadurch hinten langsamer; es entsteht ein Überdruck. Die Größe des Unterdruckes wird nur durch *-BLC-PANS* gut erfasst; *-slip-PANS* zeigt nur eine kleine Druckdifferenz. Bei *-move-PANS* sinkt der Druck zwar vorne, bleibt aber immer als Überdruck bestehen. Das Überdruckgebiet im hinteren Teil wird von *-BLC-PANS* und *-slip-PANS* genauer wiedergegeben als von *-move-PANS*. Bei der nächsten Position $x/L = -0,80$ breitet sich der Unterdruck weiter nach hinten aus. Die beste Übereinstimmung liefert wieder *-BLC-PANS*. Bei *-slip-PANS* ist der Unterdruckanstieg verspätet; der Unterdruck steigt bei dieser Position in dem vorderen Teil weiter an. Bei dem Vorderrad entsteht bei dieser Simulation der größte Unterdruck. Von *-move-PANS* wird vorne wieder ein Überdruck angezeigt. Im Gegensatz dazu entstehen hinter den Rädern zu starke Unterdrücke. Bei der Position $x/L = -0,80$, bei der die erste PKW-Hälfte neben dem LKW steht, schwächt sich vorne der Unterdruck ab und intensiviert sich in dem hinteren Teil. Der Unterdruckabbau in dem vorderen Teil wird durch *-slip-PANS* gut verfolgt. Bei *-BLC-PANS* wird der Unterdruck deutlich weniger reduziert. Die Intensität des Unterdruckes hinten wird wiederum von *-BLC-PANS* besser erfasst. Bei geraden Flächen sinkt der Unterdruck im Fall von *-slip-PANS* sehr stark. Bei der nächsten Position $x/L = 0,00$ wirkt auf den PKW wieder das LKW-Staugebiet. Auf der Front entsteht ein Überdruck; hinten steigt dank der schnellen Kanalströmung der Unterdruck nur leicht. Während die Simulation *-BLC-PANS* den Überdruck vorne gut trifft, überschätzt sie hinten deutlich den Unterdruck. Bei *-slip-PANS* wird der Überdruck sehr schwach ausgeprägt. Hinten steigt der Unterdruck nicht so rasant an wie bei *-BLC-PANS*. Die Simulation *-move-PANS* zeigt richtigerweise vorne Überdruck und hinten Unterdruck. Leider ist sie immer durch zu starken Unterdruck hinter den Rädern geprägt. Weiter setzt sich der Überdruck aus dem LKW-Staugebiet immer stärker durch. Bei der Position $x/L = 0,39$ entsteht in dem vorderen Teil ein starker Überdruck, der von *-BLC-PANS* deutlich überschätzt und von *-slip-PANS* und *-move-PANS* schwächer abgebildet wird. Bei der zweiten Fahrzeughälfte, bei der der PKW noch an den LKW grenzt, überschlägt sich der Überdruck in einen Unterdruck. Der Unterdruckanstieg im Vergleich zur vorherigen Position ist nur moderat. Durch *-BLC-PANS* wird der Anstieg deutlich überschätzt; bei *-slip-PANS* steigt der Unterdruck, in Übereinstimmung mit Experiment, leicht an. Die *-move-PANS* Simulation ist wieder durch einen starken Unterdruck hinter den Rädern geprägt. Wenn der PKW bei der Position $x/L = 0,77$ komplett vor dem LKW steht, reduziert sich der Überdruck auf der Front wieder; der Unterdruck wandert nach hinten und verbreitert sich über die ganze zweite Fahrzeughälfte. Bei dieser Position stimmt der Überdruck von *-BLC-PANS* besser mit dem Experiment überein. Der Überdruck ist bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* schwächer ausgeprägt und im Heckbereich verbleibt sogar noch ein Unterdruck. Die starken Unterdrücke im Heck deuten bei den Simulationen auf eine Beschleunigung der Strömung hin, die so dem LKW ausweicht. Bei der letzten Position $x/L = 1,17$ schwächt sich der Überdruck in dem vorderen Teil weiter ab, während er hinten noch groß bleibt. Die Druckabsenkung und der Druckanstieg wird von *-BLC-PANS* wieder am besten abgebildet. Bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* wird der Überdruck ebenfalls abgeschwächt und somit zu wenig ausgeprägt. In manchen Messpunkten im Heckbereich entsteht sogar ein Unterdruck. Die *-move-PANS* liefert sogar einen Überdruck an den Abrundungen der Stirnfläche und wieder einen starken Unterdruck hinter den Rädern. Bei fast jeder Position entsteht auf der Abrundung am Heck bei den Simulationen ein deutlich kleinerer Druck als bei dem Experiment. Das heißt, dass bei den Simulationen die Strömung an der Heckabrundung mit größerer Geschwindigkeit abgebildet wird.



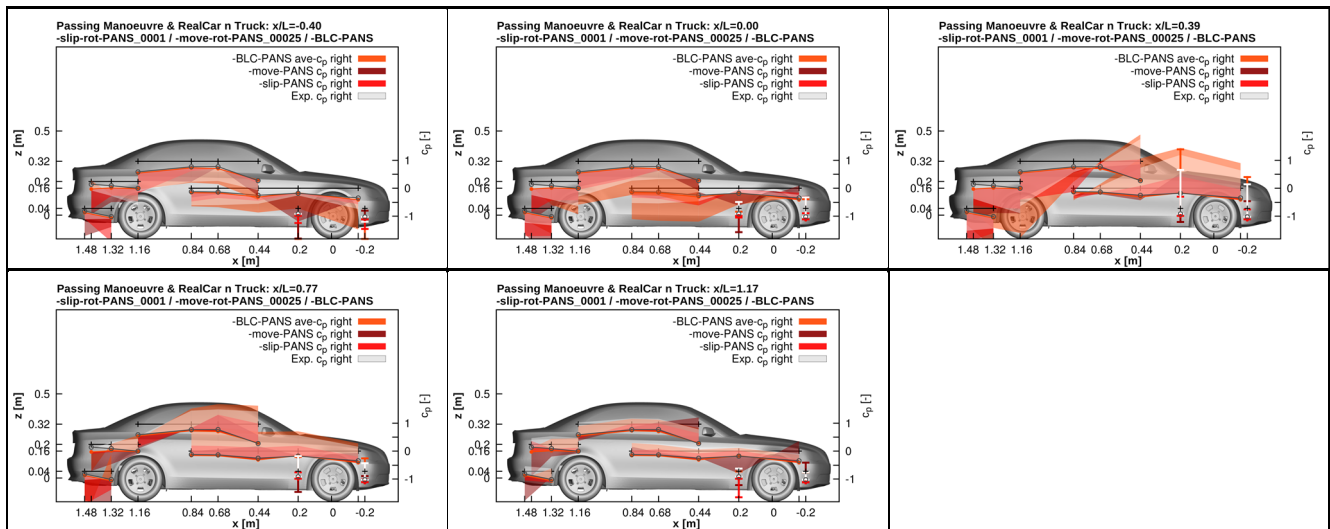
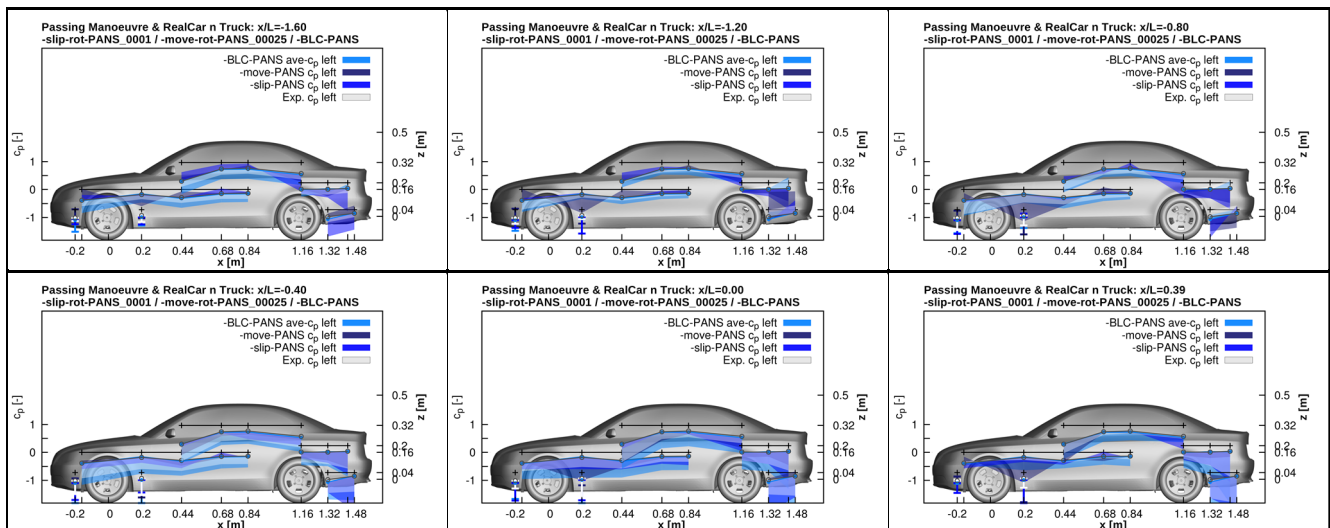


Bild 6.13: Die Druckveränderung bei der Überholung auf der rechten Seite des PKWs beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip-rot- / move-rot- und RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-* Simulationen zum Solofahrzeug *RealCar_Calculation4-Wheels-BLC-* in allen Positionen.

Die Situation an der linken vom LKW abgewandten Fahrzeugseite des PKWs während des Überholvorgangs beschreibt Bild 6.14. Laut Experiment herrschen auf der linken Seite bei der Positionen, bei der der PKW hinter dem LKW-Staugebiet steht, überwiegend Unterdrücke. Weil die Strömung um den PKW bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* etwas langsamer dargestellt wird, entstehen bei den Positionen $x/L = -1,60$, $x/L = -1,20$ und $x/L = -0,80$ an den geraden Flächen leichte Überdrücke. Die Tendenz, dass im Windkanal der Druck in $x/L = -1,60$ kleiner als in $x/L = -1,20$ ist, die im Kapitel 5.2.1.3 diskutiert wurde, wurde bei den Simulationen der Überholung auf der Straße *-slip-PANS* und *-move-PANS* nicht nachgewiesen. Vor allem an den geraden Flächen nimmt der Überdruck, je mehr sich der PKW dem LKW-Totwasser nähert, ab. Bei den Positionen $x/L = -1,20$ und $x/L = -0,80$ zeigt das Experiment im Heckbereich ein Überdruck. Dieser wird nur durch *-BLC-PANS* abgebildet; *-slip-PANS* und *-move-PANS* zeigen dort in den meisten Messpunkten einen Unterdruck. Bei der Position $x/L = -0,40$, bei der sich der PKW komplett neben dem LKW befindet, erreicht der Unterdruck sein Maximum. Durch die Wirkung des LKW-Staugebietes reduziert sich der Unterdruck bei der Position $x/L = 0,00$ wieder. Von *-BLC-PANS* wird der Überdruck überschätzt. Bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* hat er einen späteren Anstieg und sinkt bei $x/L = 0,00$ weiter. Bei der nächsten Position $x/L = 0,39$ wird der Unterdruck sowohl im Experiment als auch bei den Simulationen geschwächt. Nur im Heckbereich steigt er an. In dem vorderen Bereich entsteht ein leichter Überdruck. Bei manchen Positionen entsteht bei *-move-PANS*, genau wie auf der rechten Seite, hinter den Rädern ein starker Unterdruck. Bei den letzten zwei Positionen $x/L = 0,77$ und $x/L = 1,17$ verursacht das LKW-Staugebiet auch an der zum LKW abgewandten Fahrzeugseite einen Überdruck. Der Druckanstieg wird wieder von *-BLC-PANS* besser verfolgt. Bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* ist der Überdruck schwächer ausgeprägt und vor allem im Heckbereich herrscht immer ein starker Unterdruck.



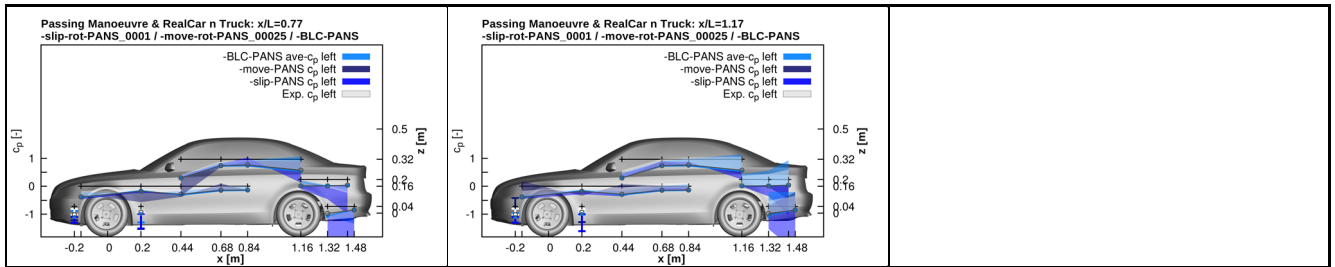
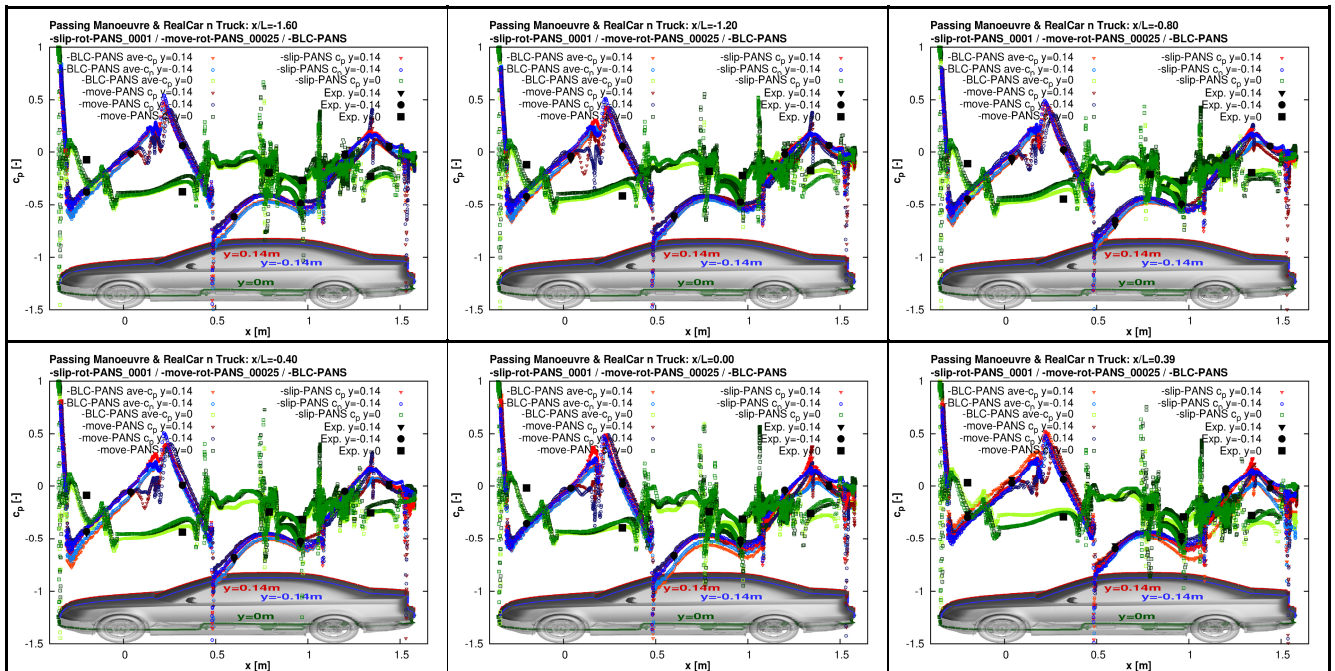


Bild 6.14: Die Druckveränderung bei der Überholung auf der linken Seite des PKWs beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip-rot- / move-rot- und RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-* Simulationen zum Solofahrzeug *RealCar_Calculation4-Wheels-BLC-* in allen Positionen.

Zum Vergleich der Druckverhältnisse auf der linken und rechten Oberseite und zugleich zwischen der Oberseite und dem Unterboden dient das Bild 6.15. Dort ist der komplette Verlauf des Druckbeiwertes c_p auf der Fahrzeugoberseite in zwei symmetrischen Ebenen $y = -0,16m$, $y = 0,16m$ und auf dem Unterboden in der Zentralebene $y = 0m$ abgebildet. Alle drei Simulationen *-BLC-PANS*, *-slip-PANS* und *-move-PANS* zeigen bei den Positionen $x/L = -1,20$, $x/L = -0,80$ und $x/L = -0,40$ rechts einen kleineren Druck als links und somit eine positive Seitenkraft c_s durch die der PKW in Richtung des LKW's angesaugt wird. In den weiteren Positionen $x/L = 0,00$, $x/L = 0,39$, $x/L = 0,77$ und $x/L = 1,17$ ändern sich die Druckverhältnisse an der linken und rechten Fahrzeugseite; der Druck wird rechts größer als links und die Seitenkraft c_s schlägt sich in eine negative um. Das Verhältnis der Oberseite zu dem Unterboden zeigt bei den Positionen $x/L = -1,60$, $x/L = -1,20$, $x/L = -0,80$, $x/L = -0,40$ und $x/L = 0,00$ bei den Simulationen *-slip-PANS* und *-move-PANS* einen höheren Druck als bei *-BLC-PANS*. Bei manchen Positionen ist dann bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* der Druck auf der Oberseite höher als auf dem Unterboden, was einen kleineren Auftrieb c_l zur Folge hat. Bei den restlichen Positionen $x/L = 0,39$, $x/L = 0,77$ und $x/L = 1,17$ ist der Druck bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* kleiner als bei *-BLC-PANS*. Bei *-move-PANS* entsteht eine deutlich stärkere Verwirbelung bei dem Windlauf. Der Druck auf der Heckscheibe und auf dem Kofferraumdeckel ist bei *-slip-PANS* bei fast allen Positionen größer als bei *-BLC-PANS*, was den experimentellen Daten besser entspricht, aber auch mit einem kleineren Luftwiderstand c_d verbunden ist. Bei den Positionen $x/L = 0,39$ und $x/L = 0,77$ wird sogar die Unterbodenströmung bei *-slip-PANS* auf dem Frontdiffusor schneller (Druck kleiner) und auf der Reserveradmulde langsamer (Druck größer), was ebenso mit dem Experiment besser übereinstimmt.



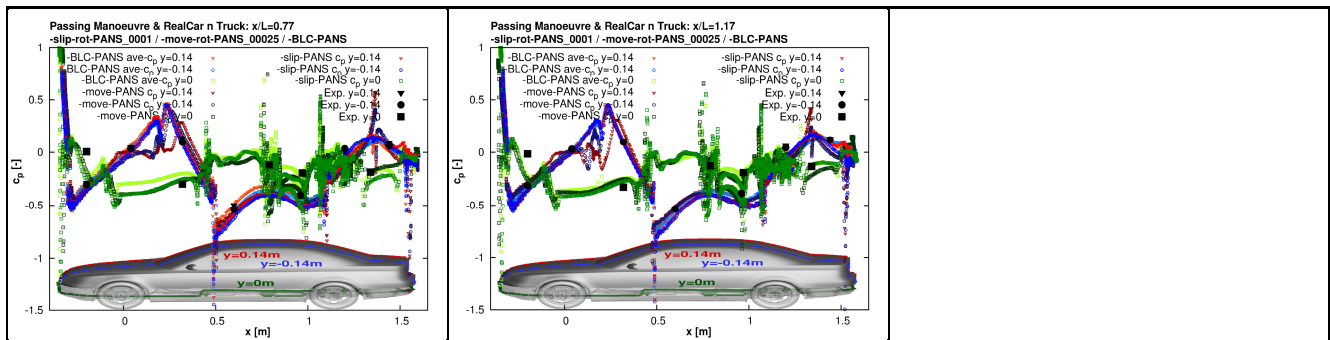


Bild 6.15: Verlauf des gemittelten Druckbeiwerts c_p auf der Ober- und Unterseite des PKWs beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip-rot- / move-rot- und RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-* Simulationen in allen Positionen der Überholung.

Wie sich die Druckdifferenz zwischen der rechten und der linken Fahrzeugseite bei den Simulationen von dem Experiment unterscheidet zeigt das Bild 6.16. Die grauen mit Linien verbundenen Kreise stellen die Druckdifferenz zwischen der rechten und linken Fahrzeugseite beim Experiment dar. Die farbigen Punkte mit Linien zeigen hier direkt den Überdruck bzw. Unterdruck auf der rechten Seite bei den Simulationen. Auf der rechten Fahrzeugseite entspricht der Überdruck einem rechts größeren Druck als links. Analog dazu bedeutet ein größerer Druck links als rechts einen Unterdruck. Für die Position $x/L = -1,60$ zeigt die Messung im Windkanal einen Überdruck auf der rechten Seite und somit eine negative Seitenkraft c_s . Die *-BLC-PANS* Simulation zeigt in manchen Messpunkten ebenfalls einen Überdruck und so ist die Seitenkraft auch leicht negativ. Im Unterschied dazu liefern *-slip-PANS* und *-move-PANS* an den meisten Punkten einen Unterdruck. Die Seitenkraft c_s ist dadurch bei dieser Position positiv, was auch der Straßenmessung entspricht. Nach den beiden experimentellen Messungen ist der Druck hinten größer als vorne, was mit dem Fahrzeug im Uhrzeigersinn giert und ein positives Giermoment c_{M_z} zur Folge hat. Der größere Druck hinten als vorne wird nur durch *-slip-PANS* wiedergegeben. Die *-BLC-PANS* und *-move-PANS* Simulationen zeigen eine umgekehrte Druckverteilung und somit ein negatives Giermoment c_{M_z} . Die nächste Position $x/L = -1,20$ zeigt einheitlich eine positive Seitenkraft c_s . Dabei entsteht auf der rechten Seite überwiegend ein Unterdruck, der durch den Saugeffekt vor allem in dem vorderen Teil stark ist. Durch den kleineren Druck vorne als hinten entsteht wieder ein positives Giermoment c_{M_z} . Eine Ausnahme stellen hier wieder *-BLC-PANS* und *-move-PANS* dar, deren Giermoment negativ bleibt und somit der Druck vorne größer als hinten sein sollte. Bei der Position $x/L = -0,80$ herrscht eine gute Übereinstimmung der Simulationen mit dem Experiment. Es entsteht dort der größte Unterdruck, der über die rechte Seite gleichmäßig verteilt ist und somit das Giermoment c_{M_z} neutralisiert. Weil das Gieren vom Fahrer mehr als der Parallelversatz wahrgenommen wird, wird die Position $x/L = -1,20$ trotz der größeren Seitenkraft c_s bei $x/L = -0,80$ einen größeren Einfluss auf die Fahrstabilität haben. Bei der nächsten Position $x/L = -0,40$, bei der der PKW zur Hälfte neben dem LKW steht, kommt es in der vorderen Hälfte zu einem Druckanstieg. Bei dem Experiment entsteht auf der rechten Seite ein Überdruck, der die Seitenkraft c_s in eine negative Seitenkraft umwandelt. Bei den Simulationen verbleibt bei dieser Position noch ein Unterdruck, womit sich dann die Seitenkraft vom Experiment unterscheidet. Außer der Simulation *-BLC-PANS* entsteht vorne ein größerer Druck als hinten und dadurch ein negatives Giermoment c_{M_z} . Bei der Position $x/L = 0,00$ erhöht sich weiter der Überdruck in der vorderen Hälfte und setzt sich auch bei den Simulationen durch. Nun schlägt sich auch bei den Simulationen die Seitenkraft c_s in eine negative um. Dies ist aber nicht so stark ausgeprägt wie beim Experiment. Die Konzentration des Überdruckes in der vorderen Fahrzeughälfte führt bei den Simulationen, in guter Übereinstimmung mit dem Experiment, zu einem negativen Giermoment c_{M_z} . Der stärkere Unterdruck in dem Heckbereich überschätzt bei *-move-PANS* das Giermoment. Das LKW-Staugebiet wirkt bei der Position $x/L = 0,39$ direkt auf die rechte vordere Fahrzeughälfte. Dadurch entstehen dort erhebliche Überdrucke, die eine starke Seitenkraft c_s verursachen. Durch den stark ausgeprägten Überdruck wird die Seitenkraft bei *-BLC-PANS* überschätzt. Der kleiner ausgeprägte Überdruck bei *-slip-PANS* unterschätzt sie wiederum. In der zweiten Hälfte, wo der PKW noch von dem LKW geschützt ist, bleibt der Druck niedrig. Durch die große Druckdifferenz vorne und hinten entsteht bei *-BLC-PANS* und *-slip-PANS* das stärkste Giermoment c_{M_z} . Dank dem starken Unterdruck im Heckbereich wird bei *-move-PANS* das Giermoment überschätzt aber gleichzeitig die Seitenkraft neutralisiert, was dem Experiment widerspricht. Wenn der PKW bei der Position $x/L = 0,77$ vor dem LKW steht, wird die rechte Seite komplett dem LKW-Staugebiet ausgesetzt. Entlang der ganzen Seite entsteht ein Überdruck. Die Simulation *-slip-PANS* bildet in

dieser Position richtigerweise die stärkste Seitenkraft c_s ab. Durch den zu starken Unterdruck im Heck wird bei *-move-PANS* die Seitenkraft wieder neutralisiert und sowohl bei *-BLC-PANS* als auch bei *-move-PANS* ein negatives Giermoment c_{M_z} wiedergegeben. Nach dem Experiment wird der Überdruck an der zweiten Fahrzeughälfte größer und somit das Giermoment positiv. Ein positives Giermoment kann nur *-slip-PANS* darstellen. Bei der letzten Position $x/L = 1,17$ trifft das LKW-Staugebiet den PKW mehr von hinten als seitlich; dadurch gleichen sich die Drücke an den Fahrzeugseiten wieder an. Der Überdruck auf der rechten Seite sinkt und reduziert somit auch die Seitenkraft c_s . Die Simulationen *-BLC-PANS* und *-slip-PANS* bilden sehr niedrige Überdrücke und somit eine leicht negative Seitenkraft c_s ab. Die Unterdrücke im Heckbereich und hinter dem Vorderrad erzeugen bei *-move-PANS* eine positive Seitenkraft. Die gleichmäßige Druckverteilung vorne und hinten neutralisiert das Giermoment c_{M_z} beim Experiment. Bei *-BLC-PANS* und *-move-PANS* ist es der starke Unterdruck am Heck, der ein negatives Giermoment verursacht. Dabei wird die Strömung, die dem LKW ausweichen will, am Heck übertrieben beschleunigt.

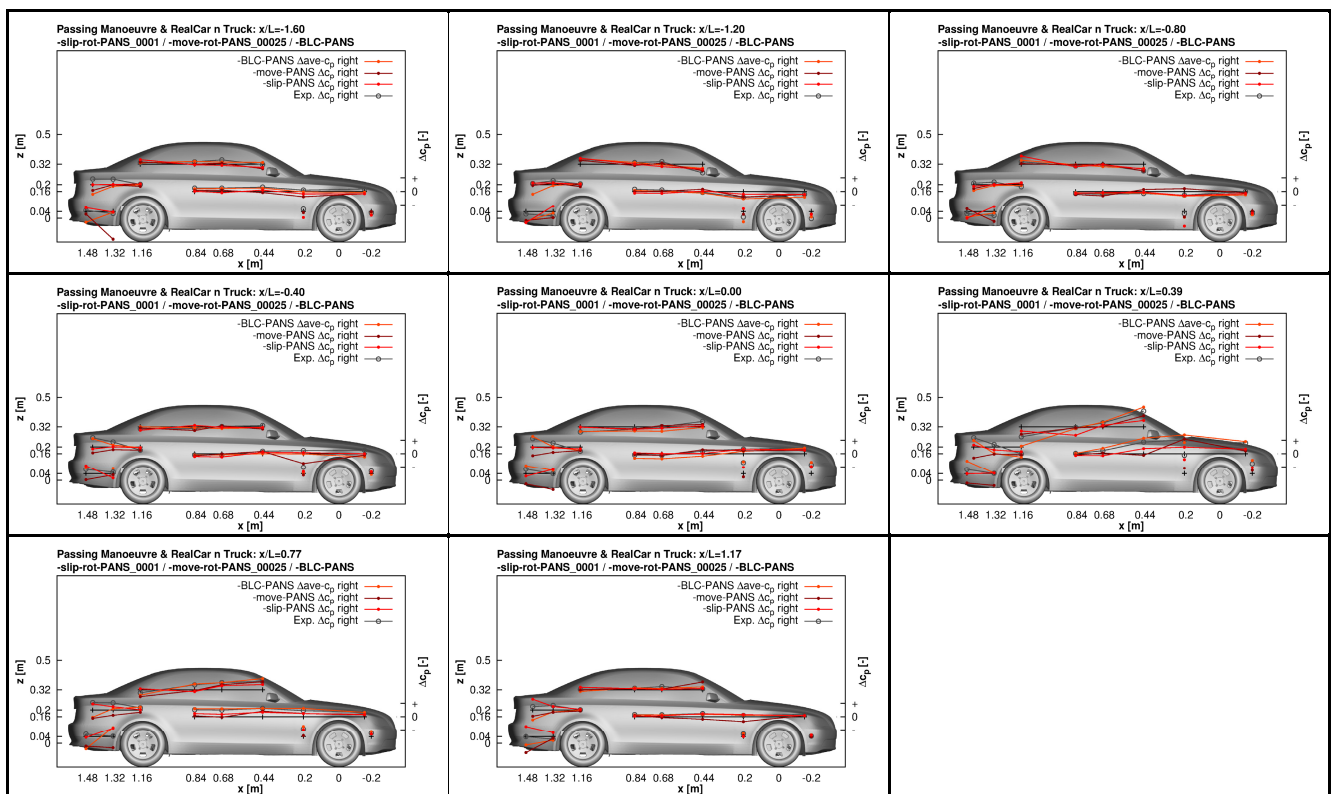


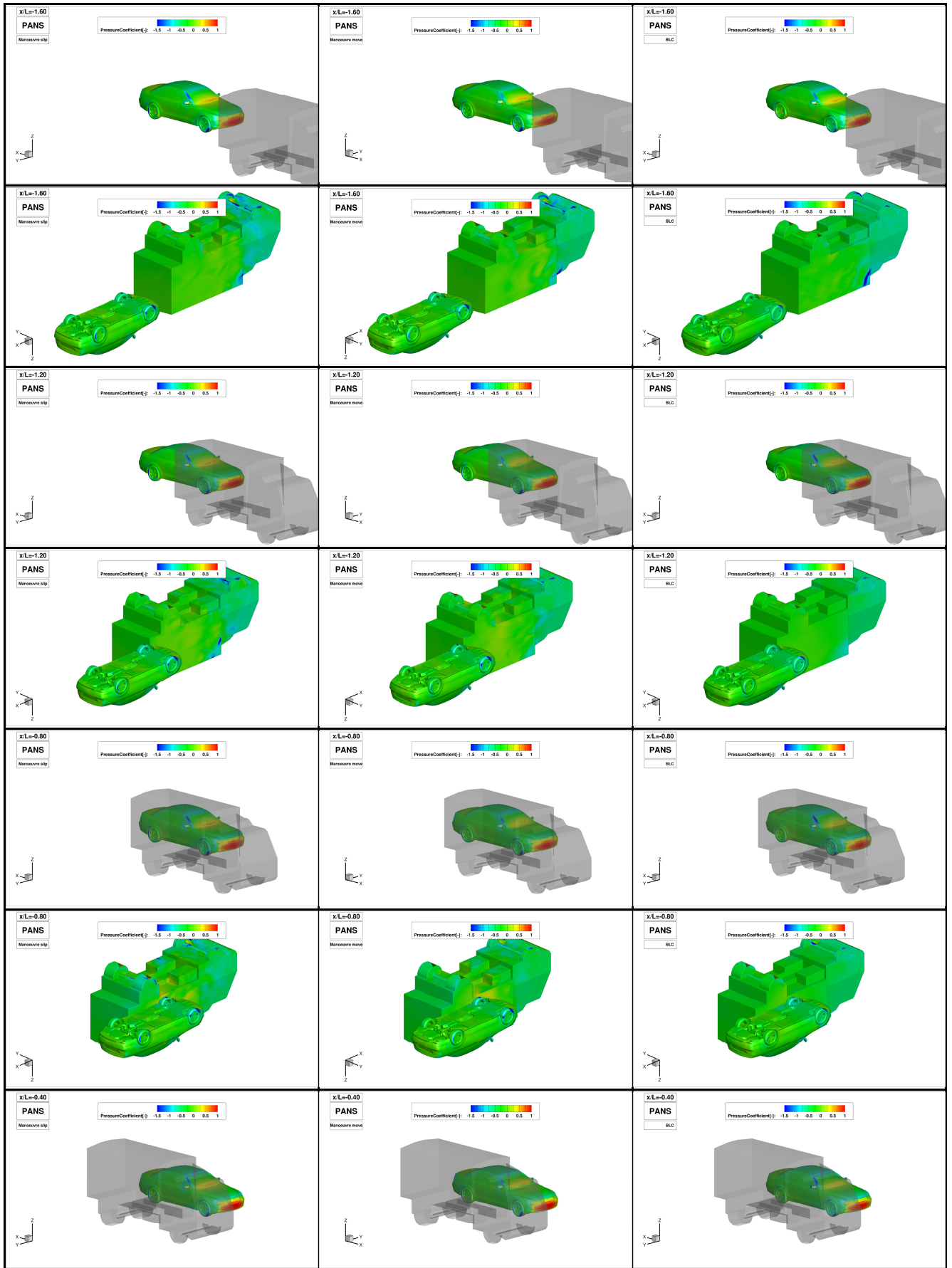
Bild 6.16: Druckdifferenz zwischen der rechten und linken Seite des PKWs beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-* und *RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-* Simulationen in allen Positionen der Überholung.

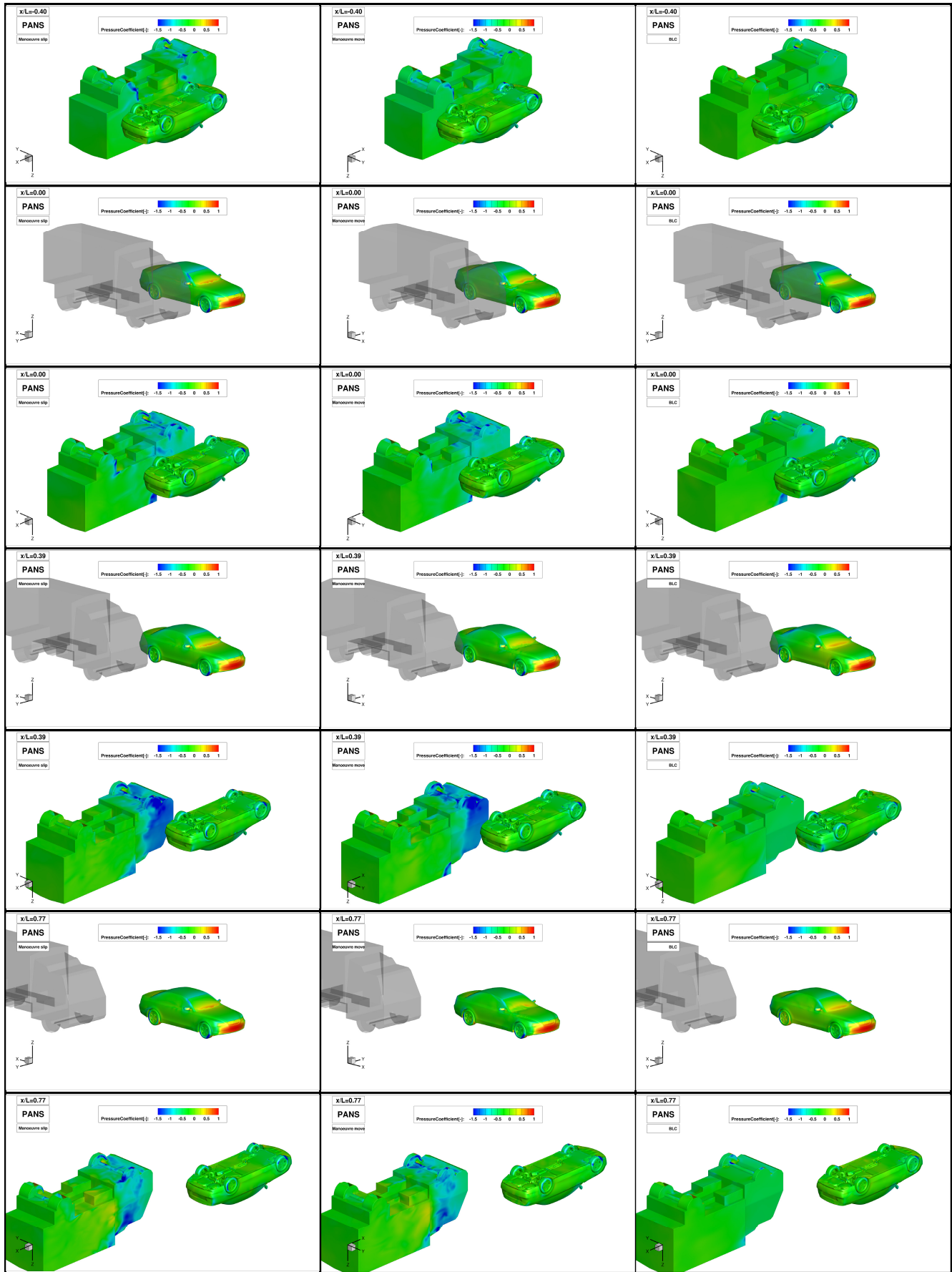
Der Luftwiderstandsbeiwert wird aus dem Druck und der Schubspannung berechnet. Die Druckzustände auf der Fahrzeugoberfläche deuten also auf das Verhalten der Luftwiderstände. Nach dem bereits beschriebenen Zusammenhang zwischen dem Druck und dem Auftrieb c_l bzw. der Seitenkraft c_s wird die Abhängigkeit des Luftwiderstandes c_d diskutiert. Dabei wird wieder auf das Bild 6.12 zurückgegriffen. Die Änderung des Luftwiderstandes c_d wird durch die Druckdifferenz am Heck beschrieben. Nach der Windschattenfahrttheorie sinkt der Luftwiderstand c_d kontinuierlich je mehr sich das Folgefahrzeug dem Führungsfahrzeug nähert. Demnach sollte der Luftwiderstand c_d über die Positionen $x/L = -1,60$, $x/L = -1,20$ und $x/L = -0,80$ durchgehend sinken. Ein kleinerer Luftwiderstand c_d bedeutet generell einen größeren Druck am Heck. Ein steigender Druck lässt sich nur bei *-slip-PANS* beobachten. Dabei ist der Druck größer und somit auch der Luftwiderstand c_d kleiner als bei dem Solofahrzeug. Während der ganzen Berechnung *-move-PANS* wird der Luftwiderstand c_d überschätzt; so fällt der Druck kleiner aus. Bei *-BLC-PANS* stört der erhöhte Luftwiderstand c_d die abfallende Tendenz in der Position $x/L = -1,60$, der auf die Interferenz mit dem Windkanal zurückzuführen ist. Bei den Positionen $x/L = -1,20$ und $x/L = -0,80$ ist dank dem Saugeffekt eine Asymmetrie auf der linken und rechten Seite zu sehen. Nach dieser Position fängt der Luftwiderstand c_d an zu steigen. Der Druck am Heck überschlägt sich und bei den Positionen $x/L = -0,40$, $x/L = 0,00$ und $x/L =$

0,39 wird ein Unterdruck im Vergleich zu dem Solofahrzeug angezeigt. Durch die Beschleunigung der Strömung und der Deformation des Totwassers, was die Interaktion zwischen beiden Fahrzeugen verursacht, sinkt der Druck hinten; vorne steigt er dank dem LKW-Staugebiet. Die sinkende Tendenz am Heck wird von allen drei Simulationen *-slip-PANS*, *-move-PANS* und *-BLC-PANS* gut abgebildet. Bei der Position $x/L = 0,39$ erreicht der Druck am Heck sein Minimum bzw. der Luftwiderstand c_d sein Maximum. Nach dieser Position sinkt der Luftwiderstand c_d wieder. Bei den letzten zwei Positionen $x/L = 0,77$ und $x/L = 1,17$ wird der PKW durch das LKW-Staugebiet mehr von hinten erreicht. Somit steigt der Druck am Heck an. Bei der Position $x/L = 1,17$ wird Druck im Vergleich zum Solofahrzeug deutlich größer und somit sinkt der Luftwiderstand c_d unter den Wert eines Solofahrzeugs und erreicht sein zweites Minimum.

Was durch das Experiment nicht möglich ist, ist die Betrachtung der Druckverteilung auf der ganzen Fahrzeugoberfläche. Auf dem Bild 6.17 wird der Druckbeiwert c_p sowohl auf der PKW- als auch auf der LKW-Oberfläche abgebildet. Weil sich die Fahrgeschwindigkeiten der beiden Fahrzeuge bei den Simulationen *-slip-PANS* und *-move-PANS* voneinander unterscheiden, wurde auch deren Druckbeiwert c_p entsprechend skaliert. Beim PKW bezieht sich der Druckbeiwert auf $V_\infty = 111,11\text{ms}^{-1}$ und beim LKW auf $V_\infty = 55,555\text{ms}^{-1}$. Bei den hinteren Positionen $x/L = -1,60$, $x/L = -1,20$ und $x/L = -0,80$ entsteht bei *-slip-PANS* und *-BLC-PANS* ein größerer Unterdruck auf der A-Säule, dem Außenspiegel und auf dem Dach als bei *-move-PANS*. In dem Windlauf findet bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* eine ungleichmäßigere Ablösung im Vergleich zu *-BLC-PANS* statt. Bei dem LKW bildet sich ein kleinerer Druck auf dem Führerhaus als auf dem Aufbau. Durch den Saugeffekt bei den Positionen $x/L = -1,20$ und $x/L = -0,80$ erhöht sich der Unterdruck auf dem rechten Scheinwerfer, dem Kotflügel und dem Vorderrad. Die Wirkung des PKW-Staugebietes ist bei $x/L = -0,80$ auf dem LKW-Aufbau und bei $x/L = -0,40$ auf dem LKW-Führerhaus durch eine Druckvergrößerung sichtbar. Auf dem PKW entstehen bei den Positionen $x/L = -0,40$ und $x/L = 0,00$ neben dem rechten Scheinwerfer, dem Kotflügel, dem Vorderrad, der A-Säule, dem Außenspiegel und dem Dach weitere Unterdruckgebiete auf der C-Säule, dem hinteren Rad und dem hinteren Kotflügel. Durch die Wirkung des LKW-Staugebietes steigt bei $x/L = 0,00$ der Druck auf der rechten A-Säule und dem vorderen Kotflügel wieder an. Bei *-move-PANS* ist der Unterdruck auf der PKW-Oberfläche weiterhin deutlich weniger ausgeprägt als bei *-slip-PANS* und *-BLC-PANS*. Weil sich der PKW bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* doppelt so schnell wie der LKW bewegt, erzeugt die dadurch beschleunigte Strömung bei den Positionen $x/L = 0,00$ und $x/L = 0,39$ auf dem LKW-Fahrerhaus einen deutlich kleineren Druckbeiwert c_p , der mit der LKW-Geschwindigkeit skaliert ist, als bei *-BLC-PANS*. Bei der Position $x/L = 0,39$ trifft das LKW-Staugebiet die vordere PKW-Hälfte und hat zur Folge einen weiteren Druckanstieg auf der A-Säule, dem vorderen Kotflügel und auf dem Dach. An der zweiten Fahrzeughälfte herrschen stets starke Unterdrücke auf der C-Säule, dem hinteren Rad und dem hinteren Kotflügel. Am stärksten ist der Unterdruck auf der C-Säule bei *-slip-PANS* ausgeprägt. Auf der A-Säule herrscht bei *-BLC-PANS* ein kleinerer Unterdruck. Die Ablösung im Windlauf wird bei *-move-PANS* deutlich ungleichmäßiger. Bei den letzten zwei Positionen $x/L = 0,77$ und $x/L = 1,17$, bei denen der PKW dem LKW-Staugebiet ganz ausgesetzt ist und sich vor dem LKW befindet, wird die Wirkung des LKW-Staugebietes auf die vordere Fahrzeughälfte kontinuierlich abgeschwächt. Auf der rechten A-Säule, dem Scheinwerfer, dem vorderen Kotflügel und auf dem Dach sinkt der Druck wieder. Trotz der Druckerhöhung auf der Fahrzeugoberfläche bildet sich auf der Heckkante und der C-Säule ein leichter Unterdruck. Die Ursache dafür ist, dass dort die Strömung dem LKW ausweichen will und an den gekrümmten Flächen beschleunigt. Der Unterdruck auf der A-Säule und dem Dach ist wieder bei *-slip-PANS* am stärksten. Bei *-move-PANS* ist die Ablösung im Windlauf stark deformiert. Die Strömung, die das LKW-Fahrerhaus trifft, wurde bei den Simulationen *-slip-PANS* und *-move-PANS* vom überholenden PKW beschleunigt und erzeugt dort somit immer tiefere Unterdruckgebiete.

Die Rotation der Räder wird bei den Simulationen *-slip-PANS* und *-move-PANS* durch eine Winkelgeschwindigkeit dargestellt. Dadurch kann das Ventilationsmoment nicht wiedergegeben werden. Diese Randbedingung an der Oberfläche beeinflusst nur ihre unmittelbare Nähe. So entstehen auf den Reifen stärkere Unterdruckgebiete als bei den nichtrotierenden Rädern der Simulation *-BLC-PANS*.





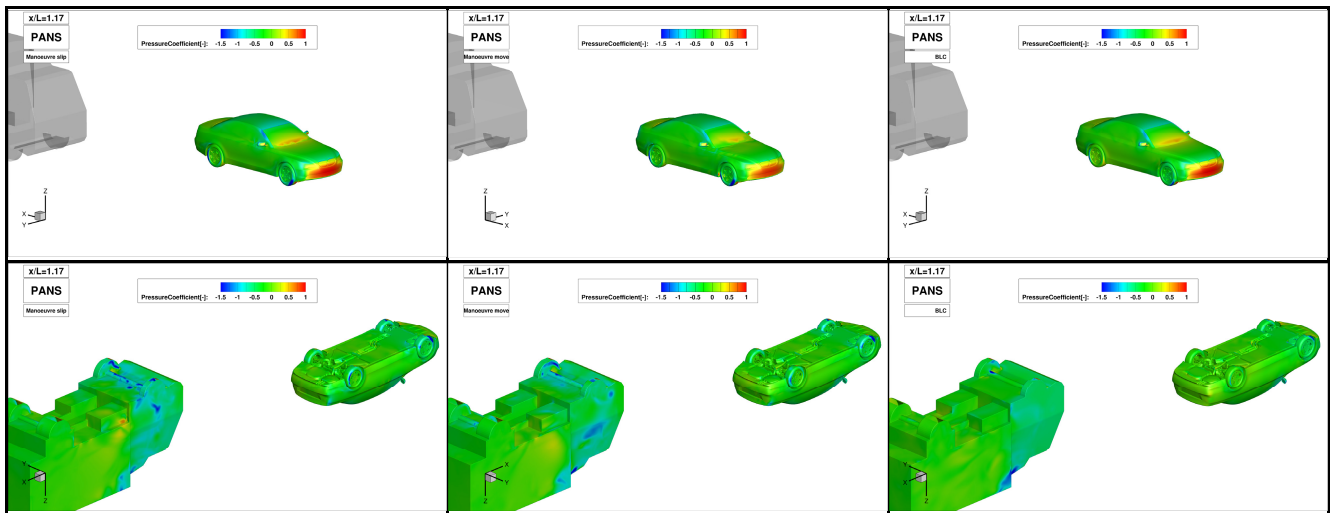
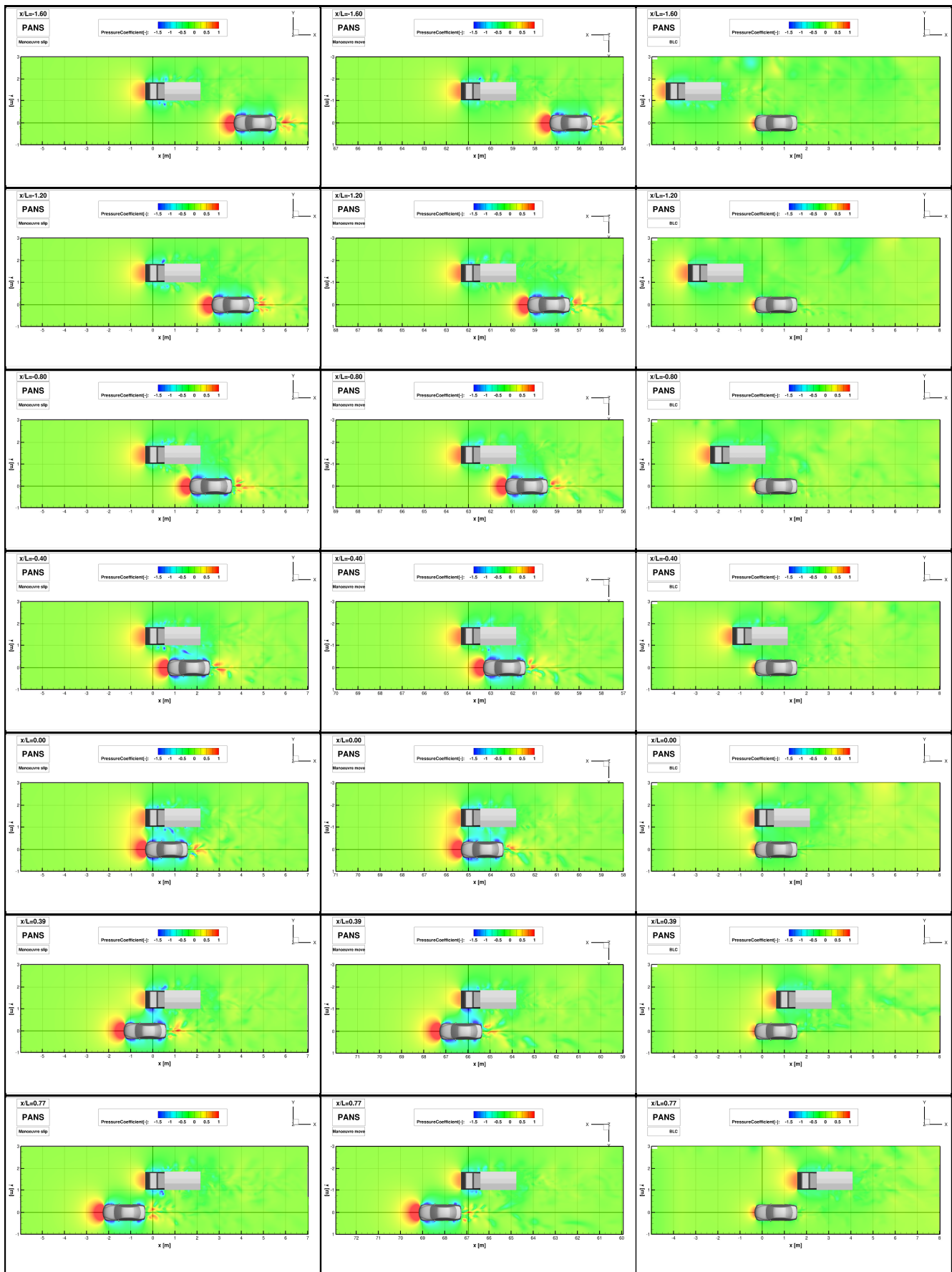


Bild 6.17: Vergleich des augenblicklichen Druckbeiwerts c_p auf der Oberfläche des PKWs und LKWs beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-* und *RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-* Simulationen in allen Positionen der Überholung.

Nachdem der Druckbeiwert c_p auf der Fahrzeugoberfläche während des Überholvorgangs beschrieben wurde, wird nun auf die Interaktion der Strömung zwischen den beiden Fahrzeugen während der Überholung eingegangen. Dazu wurde die Ebene $z = 0,08m$ ausgewählt, die auf dem Bild 6.18 dargestellt ist. Um einen besseren Vergleich zu gewährleisten, stellt der Druckbeiwert c_p bei allen drei Simulationen *-slip-PANS*, *-move-PANS* und *-BLC-PANS* genau wie bei dem vorherigen Bild 6.17 einen augenblicklichen, nichtgemittelten Wert dar. Die Skalierung kann sich aber bei dieser Darstellung nur auf eine Geschwindigkeit beziehen; in diesem Fall wurde die LKW-Geschwindigkeit $V_\infty = 55,555ms^{-1}$ gewählt. Dadurch wird sich der Druckbeiwert bei dem PKW im Idealfall um das Vierfache unterscheiden. Das PKW-Staugebiet, der Nachlauf und die Unterdrücke bei den Rädern sind übertrieben dargestellt.

Was das PKW-Staugebiet angeht, wirkt es in $x/L = -1,60$ bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* auf den LKW intensiver als bei *-BLC-PANS* und mindert bereits das Unterdruckgebiet auf der linken Seite des LKWs. Bei den nächsten Positionen $x/L = -1,20$, $x/L = -0,80$ und $x/L = -0,40$ hat das PKW-Staugebiet eine ähnliche Wirkung auf den LKW und hindert vor sich weiter die Entstehung der Ablösung an der linken LKW-Seite. Bei der Position $x/L = 0,00$ ist bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* eine stärkere Interferenz der beiden Staugebiete zu sehen. Nach dieser Position wirkt umgekehrt das LKW-Staugebiet auf den PKW und mindert die Unterdruckgebiete bei ihm. Bei der Position $x/L = 0,39$ wirkt das LKW-Staugebiet auf die vordere PKW-Hälfte, bei $x/L = 0,77$ auf die ganze rechte PKW-Seite und bei $x/L = 1,17$ mehr auf das PKW Heck. Dank der höheren PKW-Geschwindigkeit bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* ist die Wirkung des LKW-Staugebietes auf den PKW schwächer. Beschäftigt man sich wieder mit dem PKW-Staugebiet, bildet sich nach seiner Wirkung zwischen den beiden Fahrzeugen ein gemeinsames Unterdruckgebiet. Dieses Phänomen entsteht bei der Position $x/L = -0,80$. Bei den Simulationen *-slip-PANS* und *-move-PANS* beeinflusst die Bewegung des PKWs das Unterdruckgebiet stärker und erzeugt dort einen deutlich niedrigeren Druck als bei *-BLC-PANS*. Bei den nächsten Positionen $x/L = -0,40$ und $x/L = 0,00$ wandert das PKW-Staugebiet nach vorne; das Unterdruckgebiet erstreckt sich über eine immer größer werdende Fläche und verstärkt seine Saugwirkung. Bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* wirkt der PKW intensiver auf den LKW als bei *-BLC-PANS*. Bei der Position $x/L = 0,39$ ist der Unterdruck zwar auf geringerer Fläche verteilt, aber am stärksten ausgeprägt. Obwohl sich die Fahrzeuge bei den letzten beiden Positionen $x/L = 0,77$ und $x/L = 1,17$ nicht mehr treffen, leben die Unterdruckgebiete rechts am Heck beim PKW und vorne links beim LKW weiter, weil die Strömung dem LKW-Staugebiet ausweichen muss. Wenn beide Fahrzeuge genug voneinander entfernt sind, bildet die Umströmung, wie es üblich ist, an beiden Fahrzeugseiten zwei gleich große Unterdruckgebiete. Diese Symmetrie wird bei beiden Fahrzeugen verletzt, wenn das eine auf das andere wirkt. Durch den Überdruck im Staugebiet wird der Druck an der zugewandten Fahrzeugseite größer als an der abgewandten und die Fahrzeuge werden voneinander abgestoßen. Das Totwasser verkleinert den Druck an der zugewandten Seite so, dass er kleiner als an der abgewandten Seite wird und das Fahrzeug Richtung Totwasser angesaugt wird. Den gleichen Saugeffekt generiert auch die so genannte Kanalströmung, die zwischen beiden Fahrzeugen entsteht, wenn diese sich zum Teil oder komplett nebeneinander befinden. Die Strömung wird in dem so entstehenden Kanal

beschleunigt; der Druck an der zugewandten Seite wird wieder niedriger als an der abgewandten. Nach der Überholung gleichen sich mit zunehmender Entfernung die Unterdrücke an beiden Fahrzeugseiten wieder an.



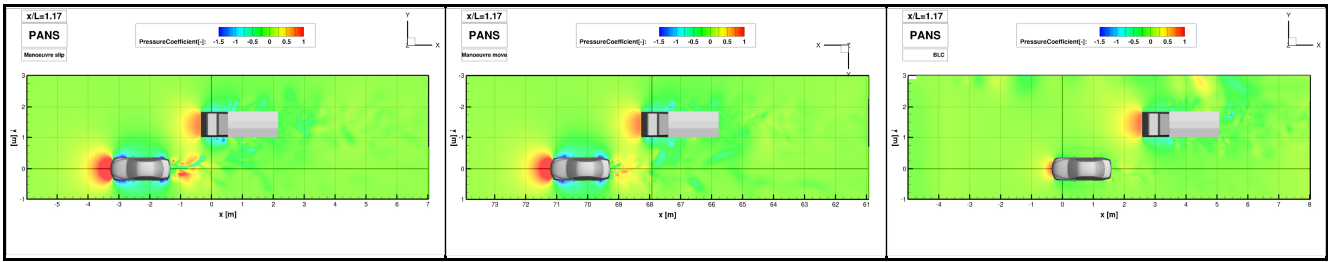
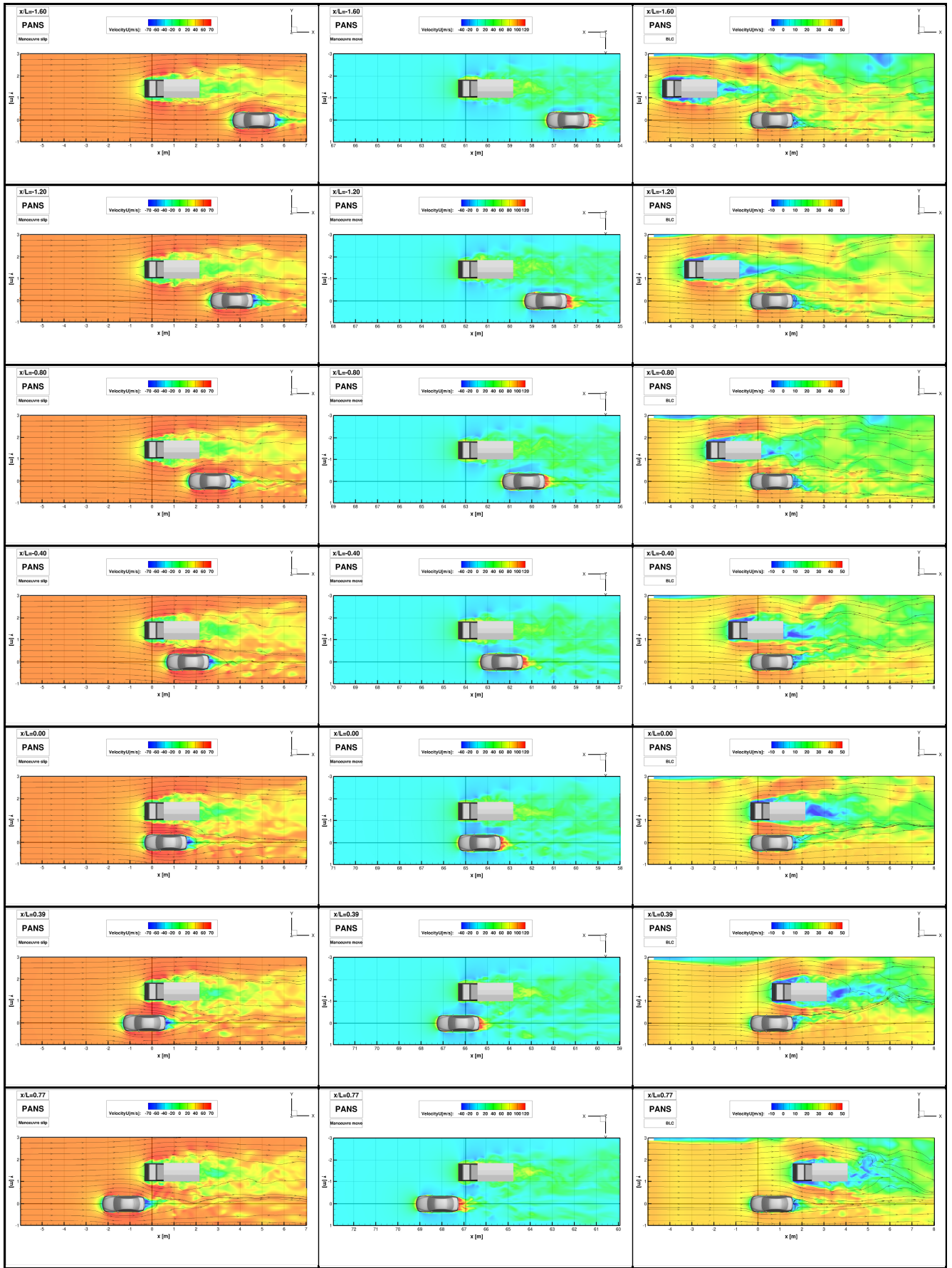


Bild 6.18: Vergleich des augenblicklichen Druckbeiwerts c_p in der horizontalen Ebene $z = 0,08m$ beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-* und *RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-* Simulationen in allen Positionen der Überholung.

Bei der Auswertung wird weiter auf die Strömungsgeschwindigkeit eingegangen. Die Geschwindigkeit wird nach der Bernoullischen Gleichung in Verbindung mit dem Druck gesetzt. Die Wechselwirkung der beiden Fahrzeuge wird auf der Ebene $z = 0,08m$ mittels der Geschwindigkeitskomponente u dargestellt (siehe Bild 6.19). An dieser Stelle wurde die Geschwindigkeitskomponente u bevorzugt, weil bei der Umströmung sowohl positive als auch negative Geschwindigkeiten auftreten. Sie stellt einheitlich den augenblicklichen, nichtgemittelten Wert dar, weil bei den Simulationen *-slip-PANS* und *-move-PANS* eine Mittelung dieses dynamischen Prozesses nicht sinnvoll ist. Bei *-slip-PANS* ist die Strömungsrichtung positiv und die PKW-Bewegung negativ. Bei *-move-PANS* ist es umgekehrt: die Fahrzeugbewegungen sind positiv und die so entstehende Umströmung negativ. Die Orientierungen wurden so gewählt, damit auf den Fahrzeugen ein positiver Luftwiderstand c_d entsteht. Die Geschwindigkeitskonturen der Simulation *-move-PANS* stellen die reale Situation auf der Straße dar, wobei die übliche Abbildung der Stromlinien nicht möglich ist. Für die einheitliche Auswertung der Simulationsergebnisse ist die positive y -Achse in Fahrrichtung rechts.

Bei der ersten Position $x/L = -1,60$ machen sich die Nachteile der Windkanalmessung sichtbar. Die *-slip-PANS* und *-move-PANS* liefern beide sowohl ein symmetrisches PKW- als auch LKW-Totwasser und Nachlauf. Der PKW wird in den LKW-Nachlauf eingesaugt und somit entsteht eine positive PKW-Seitenkraft c_s . Die Strömung zwischen den beiden Fahrzeugen ist durch den PKW leicht nach rechts abgelenkt. Durch den hier langsam entstehenden Saugeffekt aus dem LKW-Totwasser ist der Druck an der rechten Seite vorne kleiner als hinten; somit ist das Giermoment c_{M_z} positiv und der PKW giert im Uhrzeigersinn. Nur *-slip-PANS* schafft es ein positives PKW-Giermoment c_{M_z} wiederzugeben. Im Vergleich dazu wird bei *-BLC-PANS* der Freistrahle durch die Interaktion mit dem Windkanal abgelenkt, biegt den PKW- bzw. LKW-Nachlauf nach links und deformiert das PKW- und LKW-Totwasser. Die Wirkung der Interferenz ist stärker als die Zwischenwirkung der beiden Fahrzeuge und erzeugt eine negative PKW-Seitenkraft c_s und negatives PKW-Giermoment c_{M_z} . Auf dem LKW ist die erste Wirkung des PKW-Staugebietes sichtbar. Damit fängt die LKW-Seitenkraft c_s an anzusteigen und der LKW wird abgestoßen. Ebenso wird dadurch das LKW-Totwasser kleiner ausgeprägt. Bei der nächsten Position $x/L = -1,20$ verstärkt sich der Saugeffekt des LKW-Totwassers weiter. Die PKW-Seitenkraft c_s steigt und das PKW-Giermoment c_{M_z} erreicht sein Maximum. Der PKW wird immer angesaugt und giert im Uhrzeigersinn. Die Simulation *-move-PANS* es schafft nicht, das positive PKW-Giermoment c_{M_z} wiederzugeben. Die Strömung an der rechten PKW-Seite wird nicht nur vorne, sondern auch hinten stärker beschleunigt. Im PKW-Totwasser herrscht rechts ein niedrigerer Druck als links; damit ist rechts eine größere Rezirkulationszone zu erwarten. Die Umströmung wird bei *-BLC-PANS* von der Interferenz beeinflusst und ist immer leicht nach links geneigt. Bei dem LKW setzt sich die starke positive Seitenkraft c_s durch. Das PKW-Staugebiet wirkt überwiegend auf die hintere Hälfte des LKWs, wobei das LKW-Giermoment c_{M_z} ein negatives Maximum erreicht. Der LKW wird vom PKW abgestoßen und giert gegen den Uhrzeigersinn. Bei der Position $x/L = -0,80$, bei der der PKW auf den LKW trifft, entsteht dank der Kanalströmung und dem LKW-Totwasser der stärkste Saugeffekt. Die positive PKW-Seitenkraft c_s erreicht ihr Maximum. Das PKW-Giermoment c_{M_z} gleicht sich aber aus, weil entlang der ganzen rechten PKW-Seite eine schnellere Strömung herrscht. Der kleinere Druck am Heck rechts macht das PKW-Totwasser an der rechten Seite stärker. Bei dem LKW kulminiert ebenso die positive Seitenkraft c_s , die das PKW-Staugebiet verursacht. Dieses Staugebiet mindert auch die Ablösung an dem LKW-Fahrerhaus. Weil auf der Höhe des PKWs beim LKW mehr Fläche in der vorderen als in der hinteren Hälfte ist, überschlägt sich das LKW-Giermoment c_{M_z} schon bei dieser Position in einen positiven Wert. Wenn der PKW komplett neben dem LKW steht, was durch die Position $x/L = -0,40$ dargestellt wird, verbleibt die schnellere Kanalströmung zwischen den Fahrzeugen. Dazu entsteht aber an der linken PKW-Seite eine ähnlich schnelle Strömung, die die PKW-Seitenkraft c_s reduziert.

Im Falle der *-move-PANS* Simulation herrscht in der Kanalströmung eine höhere Geschwindigkeit als an der linken PKW-Seite und somit verbleibt die PKW-Seitenkraft c_s positiv. An der PKW-Front setzt sich langsam die Wirkung des LKW-Staugebietes durch und verursacht ein negatives PKW-Giermoment c_{M_z} , das weiter kontinuierlich steigt. Der PKW giert gegen den Uhrzeigersinn. Durch die Zusammenwirkung der beiden Totwassergebiete entstehen im PKW-Totwasser größere Unterdrücke; dadurch wird die Rezirkulationszone verstärkt. Auch die LKW-Seitenkraft c_s überschlägt sich von positiv auf negativ. Der LKW wird nicht mehr abgestoßen sondern angesaugt. Weil das PKW-Staugebiet am stärksten auf die vordere LKW-Hälfte wirkt, erreicht das LKW-Giermoment c_{M_z} sein Maximum und giert mit dem LKW im Uhrzeigersinn. Bei der weiteren Position $x/L = 0,00$ wird der niedrige Druck in der Kanalströmung durch den Überdruck aus dem LKW-Staugebiet kompensiert woraus eine niedrige PKW-Seitenkraft c_s und ein negatives PKW-Giermoment c_{M_z} resultiert. Durch eine stärkere Interaktion der Totwassergebiete vergrößern sich die Unterdrücke im PKW-Totwasser. Das PKW-Totwasser wird dadurch vergrößert und nach rechts geneigt. Ebenso vergrößert sich das LKW-Totwasser und neigt nach links. Der Unterdruck in der schnellen Kanalströmung, der entlang der ganzen Fahrzeugseiten entsteht, verursacht bei dem LKW die höchste Seitenkraft c_s , durch die der LKW am stärksten angesaugt wird. Die Wirkung des PKW-Staugebietes lässt nach, die der Kanalströmung nimmt zu und das LKW-Giermoment c_{M_z} überschlägt sich von positiv auf negativ. Die stärkste Wirkung des LKW-Staugebietes auf den PKW, die nur auf der vorderen Hälfte erfolgt, während die hintere Hälfte noch unter dem Einfluss des Unterdrucks der Kanalströmung steht, verursacht die bei der Position $x/L = 0,39$ starke negative PKW-Seitenkraft c_s und das stärkste negative PKW-Giermoment c_{M_z} . Der PKW wird abgestoßen und giert gegen den Uhrzeigersinn. Der stets starke Unterdruck im PKW-Totwasser verrät eine intensive Interaktion der beiden Totwassergebiete, durch die sie vergrößert und zu sich geneigt werden. In der Kanalströmung interagieren die Beschleunigungen an der PKW-Heckkrümmung und an der LKW-Front. Dadurch entsteht in der vorderen LKW-Hälfte ein kleinerer Druck und somit ein negatives LKW-Giermoment c_{M_z} , das in der Position sein Maximum erreicht und mit dem LKW gegen den Uhrzeigersinn giert. Die schnelle Kanalströmung verursacht weiterhin eine stark negative LKW-Seitenkraft c_s und saugt den LKW an. Die Verläufe der LKW-Seitenkraft c_s und des LKW-Giermoments c_{M_z} weichen bei *-BLC-PANS* bei den Positionen, bei denen der LKW nahe dem Kollektor steht, von der Straßenmessung ab. Dies ist wieder auf die Interferenz mit dem Windkanal zurückzuführen. Bei der Position $x/L = 0,77$, bei der der PKW schon vor dem LKW steht, wirkt das LKW-Staugebiet auf die komplette rechte PKW-Seite und hat somit die stärkste negative Seitenkraft c_s zur Folge. Weil die Wirkung auf die rechte Seite einheitlich verteilt ist, reduziert sich das PKW-Giermoment c_{M_z} . Der PKW wird beim minimalen Gieren stark abgestoßen. Das Überdruckgebiet mindert die Strömungsgeschwindigkeit. Eine beschleunigte Kanalströmung herrscht nur noch zwischen der LKW-Front und dem PKW Heck, die dann den PKW-Nachlauf zu sich umlenkt. In dem PKW-Totwasser herrscht dagegen rechts ein größerer Druck als links; die linke Rezirkulationszone wird also stärker ausgeprägt. Durch den erhöhten Druck aus dem LKW-Staupunkt wird das PKW-Totwasser insgesamt kleiner. Bei *-move-PANS* reagiert der PKW nicht wirklich auf das LKW-Staugebiet. Der LKW-Nachlauf wird von dem PKW-Nachlauf gespeist. Das LKW-Totwasser wird wieder symmetrisch und hat eine normale Größe. Die abgeklungene Kanalströmung minimiert die LKW-Seitenkraft c_s und sinkt das LKW-Giermoment c_{M_z} . Bei der letzten Position $x/L = 1,17$ wird die Zusammenwirkung mit zunehmender Entfernung weiter abgeschwächt. Das LKW-Staugebiet wirkt auf den PKW schwächer und mehr symmetrisch. Dadurch bleibt die noch leicht negative PKW-Seitenkraft c_s erhalten und das PKW-Giermoment c_{M_z} minimiert sich. Die Strömung muss der LKW-Front ausweichen und trifft dabei auf das PKW Heck. Im PKW-Totwasser herrscht ein erhöhter Druck, der die Rezirkulationszone verkleinert. Der PKW-Nachlauf schwimmt Richtung LKW-Nachlauf ab und interagiert mit ihm. Dabei trifft der PKW-Nachlauf auf die linke LKW-Seite. Die langsame Strömung hat einen Anstieg der positiven LKW-Seitenkraft c_s zur Folge. Weil durch die Strömungsumlenkung an der LKW-Front die Strömungsbeschleunigung dominiert, während in dem hinteren Teil des LKWs der PKW-Nachlauf die Strömung bremst, entsteht dabei ein leicht negatives Giermoment c_{M_z} , das mit dem LKW gegen den Uhrzeigersinn giert. Das LKW-Totwasser entwickelt sich dabei weiter symmetrisch.



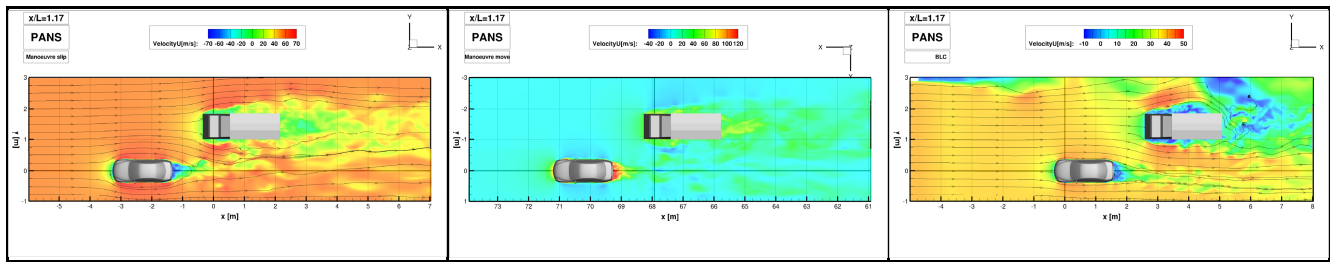
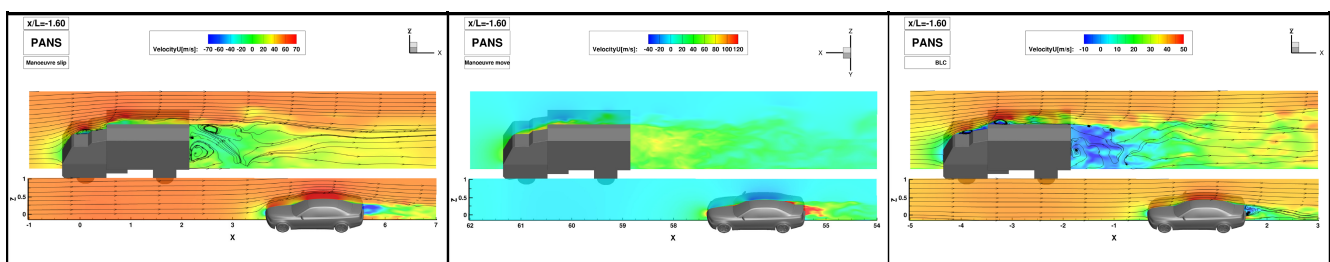


Bild 6.19: Vergleich der augenblicklichen U -Geschwindigkeit in der horizontalen Ebene $z = 0,08m$ beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-* und *RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-* Simulationen in allen Positionen der Überholung.

Als nächstes werden die PKW- und LKW-Nachläufe sowie die Totwässer und die Umströmung der beiden Fahrzeuge in der vertikalen Ansicht auf dem Bild 6.20 betrachtet. Dazu wurde wieder die augenblickliche Geschwindigkeitskomponente u in den zwei Längsmittelschnitten $y = 0m$ und $y = 1,432m$ verwendet. Der Geschwindigkeitsbetrag würde das LKW-Totwasser zwar sichtbarer machen, er würde aber auch die negativen Geschwindigkeiten in dem PKW-Totwasser bei *-slip-PANS* und die negative Umströmung auf der PKW-Oberfläche bei *-move-PANS* als positiv darstellen, was für den Betrachter verwirrend wäre.

Bei den hinteren Positionen $x/L = -1,60$ und $x/L = -1,20$ wirkt das PKW-Staugebiet auf das LKW-Totwasser, wodurch es kleiner ausgeprägt ist. Zusätzlich wird das LKW-Totwasser bei der Position $x/L = -0,80$ von der Kanalströmung Richtung PKW geneigt, was es in dem Längsmittelschnitt kleiner macht. Bei den nächsten Positionen $x/L = -0,40$, $x/L = 0,00$ wird es im Gegensatz dazu, dank der Interaktion mit dem PKW-Totwasser, vergrößert. Das PKW-Totwasser wird bei den Positionen $x/L = -0,40$, $x/L = 0,00$ und $x/L = 0,39$ zum Teil durch die Interaktion zwischen den Totwässern und zum Teil durch den niedrigeren Druck in der Kanalströmung verstärkt. Ab der Position $x/L = -0,40$ bis zur Endposition $x/L = 1,17$ wird der LKW-Nachlauf von dem PKW-Nachlauf gespeist und dissipiert somit langsamer. Bei den vorderen Positionen $x/L = 0,77$, $x/L = 1,17$ schrumpft das PKW-Totwasser dank dem Hochdruck aus dem LKW-Staugebiet. Dabei nimmt das LKW-Totwasser wieder eine normale Größe an. Die Geschwindigkeit steigt beim PKW auf der Motorhaube, der Windschutzscheibe, dem Dach und dem Kofferraumdeckel in den hinteren Positionen kontinuierlich an. Bei den Positionen $x/L = 0,00$ und $x/L = 0,39$ erreicht sie ihre Höchstwerte. Bei den vorderen Positionen $x/L = 0,77$, $x/L = 1,17$ wird sie durch die Wirkung des LKW-Staugebietes signifikant abgeschwächt. In Ähnlichkeit dazu hat die Geschwindigkeit auf dem Führerhaus- und dem Aufbaudach des LKWs eine steigende Tendenz, wodurch sich die Ablösungsgebiete an den Dachkanten verkleinern. Bei den Positionen $x/L = 0,00$ und $x/L = 0,39$, bei denen der Saugeffekt beim LKW am stärksten ist, erreicht auch der Geschwindigkeitsanstieg sein Maximum. Mit zunehmender Entfernung des PKWs bei den Positionen $x/L = 0,77$ und $x/L = 1,17$ reduziert sich die Geschwindigkeit wieder und die Rezirkulationszonen wachsen an. Vergleicht man nun die Simulationen untereinander, zeigen *-slip-PANS* und *-move-PANS* einen größeren PKW-Nachlauf als *-BLC-PANS*. Beim Vergleich zwischen *-slip-PANS* und *-move-PANS* stimmt die Randbedingung der bewegten Fahrbahn bei *-slip-PANS*, was die Höhe des PKW-Nachlaufs betrifft, mit der Haftbedingung bei *-move-PANS* überein. Dies beweist die richtige Wahl der Randbedingung und die damit verbundene Grenzschichtbildung für die Fahrbahn bei *-slip-PANS* im Fall einer Anströmgeschwindigkeit. Die *-slip-PANS* und *-move-PANS* Simulationen bilden den realen Zustand auf der Straße ab, während die Simulation *-BLC-PANS* die Windkanalmessung, die nur versucht, die realen Bedingungen z.B. durch die Grenzschichtabsaugung *BLC* darzustellen, nachbildet. Die Abweichungen zwischen *-slip-PANS*, *-move-PANS* und *-BLC-PANS* kommen von der Problemlösung her und haben keinen Bezug zu den Simulationseinstellungen.



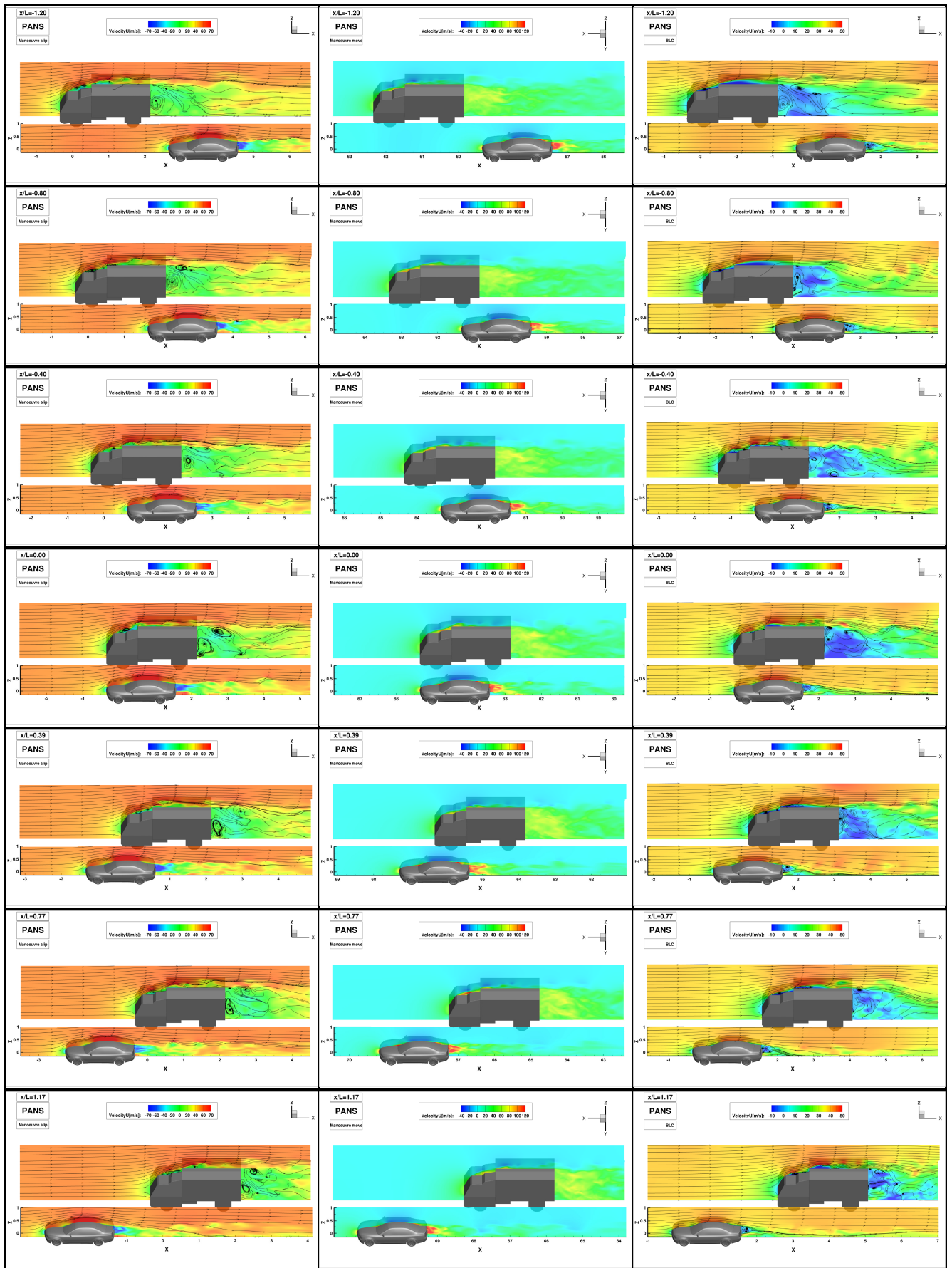
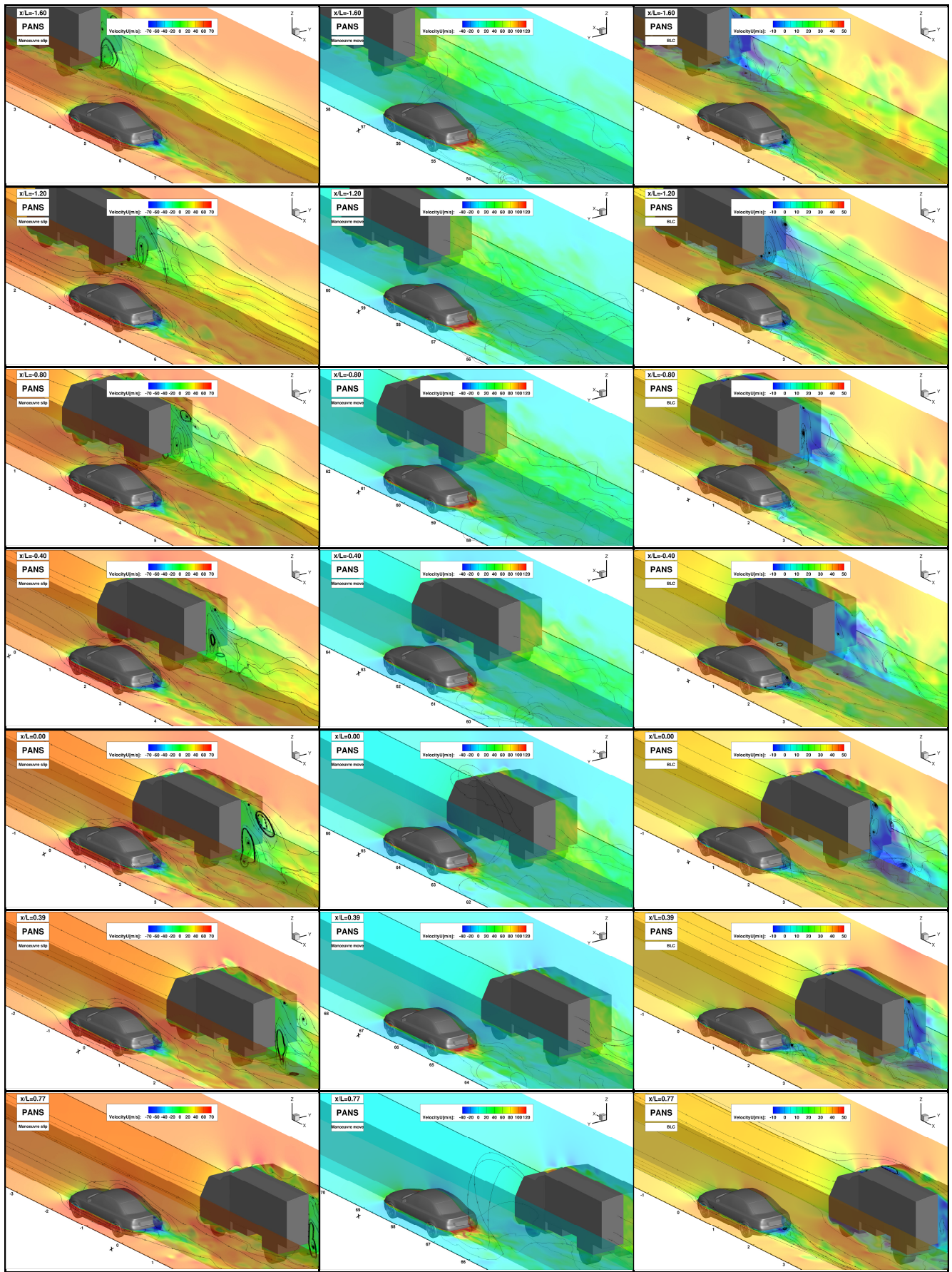


Bild 6.20: Vergleich der augenblicklichen U -Geschwindigkeit im PKW- und LKW-Längsmittelschnitt beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-* und *RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-* Simulationen in allen Positionen der Überholung.

Nach der zweidimensionalen Darstellung der PKW- und LKW-Totwässer sowie der Nachläufe zeigt das Bild 6.21 eine dreidimensionale Darstellung, wenn an den horizontalen und vertikalen Ebenen Spuren der dreidimensionalen Wirbelstrukturen erfasst werden. Aus dem Kapitel 4.2.1.3 wurden die horizontale Ebene $z = 0,08m$ und die vertikale $y = 0,1m$ Ebene, bei denen das Solofahrzeug die intensivsten Spuren des Ringwirbels hatte, übernommen. Bei dem LKW wird unverändert wie im Kapitel 5.2.1.3 die Zentralebene $y = 1,432m$ verwendet. Um die Geschwindigkeit in allen Strömungsbereichen korrekt darzustellen, eignet sich wieder am besten die Geschwindigkeitskomponente u . Dabei handelt es sich wieder um nichtgemittelte Werte, die nur eine Momentaufnahme der Strömung darstellen. Im Falle der Simulation *-move-PANS* handelt es sich nicht wie bei *-slip-PANS* und *-BLC-PANS* um Stromlinien, die an bestimmte Fläche gebunden sind, sondern um sogenannte Volumenstromlinien, welche bei solch einer Simulationsart ein sinnvolles Bild liefern.

Bei der hinteren Position $x/L = -1,60$ herrscht an der rechten PKW-Seite ein kleinerer Druck als an der linken (siehe Bild 6.16). Die Umströmung ist somit rechts schneller und die Stromlinien in dem PKW-Nachlauf sind ebenfalls in die Richtung geneigt. Die Simulation *-BLC-PANS* stellt eine Ausnahme dar, da die Stromlinien in dem PKW-Nachlauf wegen der Interferenz des LKWs mit dem Windkanal in die andere Richtung geneigt werden. Der niedrige Druck im PKW-Totwasser (siehe Bild 6.12) ist mit seinem Wachstum verbunden. Auf der vertikalen Ebene sind in dem PKW-Totwasser zwei gegenläufig drehende Wirbel sichtbar, die als Spuren des Ringwirbels aufzufassen sind. Die Wirkung des PKW-Staugebietes auf den LKW ist anhand der Stromlinien bei *-move-PANS* gut sichtbar, da sie aus dem PKW-Staugebiet in das LKW-Totwasser fließen. Durch das Hochdruckgebiet wird das LKW-Totwasser verkleinert. Die Stromlinien in dem LKW-Nachlauf weichen dann dem PKW aus. Im LKW-Totwasser ist bei *-slip-PANS* ein angelegter, wegen der schnelleren Unterbodenströmung, dominanter Unterkantenwirbel und ein abgelöster Oberkantenwirbel bei dieser Momentaufnahme sichtbar. Die nächste hintere Position $x/L = -1,20$ zeigt an der rechten PKW-Seite eine wachsende Wirkung des LKW-Totwassers. Durch das Tiefdruckgebiet wird der Druck an dem PKW rechts kleiner (siehe Bild 6.16) und somit die Umströmung schneller als links. Die Stromlinien zeigen weiterhin einen PKW-Nachlauf der nach rechts geneigt ist. Bei *-BLC-PANS* überwiegt immer noch die Windkanalinterferenz und nach den Stromlinien bleibt der PKW-Nachlauf nach links geneigt. Die Druckdifferenz im PKW-Totwasser zwischen einem niedrigeren Druck rechts und einem höheren Druck links (siehe Bild 6.12) spiegelt sich in der Geschwindigkeitsverteilung wieder, wo eine starke Rezirkulationszone rechts und eine Verkleinerung des Totwassers zu sehen ist. Bei *-move-PANS* ist auf der vertikalen Ebene ein abschwimmender Oberkantenwirbel deutlich. Die Wirkung des PKW-Staugebietes auf das LKW-Totwasser intensiviert sich; dadurch wird das Totwasser weiter verkleinert. Die Stromlinien im LKW-Nachlauf weichen stärker dem PKW aus, das LKW-Totwasser deformiert sich und wird an der dem PKW zugewandten Seite kleiner ausgeprägt. Bei *-slip-PANS* zeigen auf dem vertikalen Schnitt die Stromlinien in dem LKW-Totwasser periodische Ablösungen auf dem Unterboden. Die Position $x/L = -0,80$ ist die Position mit der größten positiven Seitenkraft c_s - sowohl beim PKW als auch beim LKW. Dabei ist die Druckdifferenz mit dem niedrigsten Druck an der rechten PKW-Seite am größten (siehe Bild 6.16). Die Stromlinien zeigen bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* einen mehr symmetrischen PKW-Nachlauf als bei *-BLC-PANS*, wo er durch die Windkanalinterferenz stets leicht nach links geneigt ist. Weil sich das LKW-Totwasser rechts von dem PKW befindet, erzeugt dieses Tiefdruckgebiet in dem PKW-Totwasser rechts einen kleineren Druck als links (siehe Bild 6.12). Der Druck aus der linken Seite wird sogar durch die Strömungsumlenkung erhöht. Anhand der Stromlinien bei *-move-PANS* wird deutlich, wie der PKW- mit dem LKW-Nachlauf interagiert und wie sie sich vermischen. Auf dem LKW erzeugt dabei das PKW-Staugebiet auch die höchste positive Seitenkraft c_s . Die Stromlinien liegen auf der linken PKW-Seite enger an als auf der rechten. In dem LKW-Nachlauf weichen sie wieder dem PKW aus. Die Momentaufnahme bietet bei *-slip-PANS* zwei abschwimmende Oberkantenwirbel und einen angelegten und dominanten Unterkantenwirbel in dem LKW-Totwasser. Wenn die beiden Fahrzeuge bei der Position $x/L = -0,40$ nebeneinander stehen, entsteht in der Lücke dazwischen eine Kanalströmung, die eine höhere Geschwindigkeit als die Umströmung aufweist. Der Druck auf der rechten PKW-Seite ist durch die Kanalströmung nicht so niedrig als durch das LKW-Totwasser in der vorherigen Position, aber immerhin kleiner als auf der linken PKW-Seite (siehe Bild 6.16). Die Stromlinien in dem PKW-Nachlauf sind zum LKW-Nachlauf geneigt. Die starke Druckverminderung in dem PKW-Totwasser (siehe Bild 6.12) deutet auf das Anwachsen der Rezirkulationszone hin. Der kleinere Druck links bedeutet eine Strömungsbeschleunigung und eine Umlenkung des Totwassers. Das schwächere PKW-Totwasser wird von dem mächtigeren LKW-Totwasser angesaugt. Beide Rezirkulationszonen interagieren dabei miteinander, sind mehr zueinander angelegt und vergrößern sich deutlich. Das LKW-Totwasser zeigt bei *-slip-PANS* wieder ein Wirbelpaar an den Ablösekannten. Die schnellere Kanalströmung, indem der Druck auf der rechten PKW-Seite kleiner als auf der linken ist, verbleibt auch bei

der nächsten Position $x/L = 0,00$. In dem vorderen Teil des PKWs setzt sich langsam die Wirkung des LKW-Staugebietes durch, die dort für einen höheren Druck als links sorgt (siehe Bild 6.16). Die Stromlinien sind zwischen den beiden Fahrzeugen dichter angeordnet und in dem PKW-Nachlauf fließen sie wieder Richtung LKW-Nachlauf. Die Drücke in dem PKW-Totwasser sinken weiter (siehe Bild 6.12), die Rezirkulationszone wächst und ist zum LKW-Totwasser hingeneigt. Beide Totwassergebiete sind weiter zueinander geneigt und die beiden Nachläufe interagieren miteinander; der LKW-Nachlauf wird von dem PKW-Nachlauf gespeist. Bei *-slip-PANS* ist im LKW-Totwasser außer dem angelegten dominanten Unterkantenwirbel noch ein großer abschwimmender Oberkantenwirbel sichtbar. Neben den Totwässern und Nachläufen interagieren auch die Staugebiete miteinander. Bei den vorherigen Positionen wirkt das PKW-Staugebiet auf die linke LKW-Seite und produziert eine positive LKW-Seitenkraft c_s , die bei dieser Position ihr Maximum erreicht. Dabei interagieren beide Staugebiete dort am stärksten, wo das eine für das andere eine Barriere darstellt und somit eine starke Abstoßwirkung hat. Diese Abstoßwirkung ist bei dem PKW bei der nächsten Position $x/L = 0,39$ am stärksten. Dabei wird der Druck an der rechten PKW-Seite in dem vorderen Teil durch die Wirkung des LKW-Staugebietes größer, während er in dem hinteren Teil dank der verbliebenden Kanalströmung kleiner als links bleibt (siehe Bild 6.16). Die Stromlinien in der Kanalströmung weichen dem LKW aus und in dem PKW-Nachlauf weichen sie in den LKW-Nachlauf ab. Im Zusammenhang mit den niedrigsten Drücken am Heck (siehe Bild 6.12) ist das PKW-Totwasser am stärksten ausgeprägt. Im Vergleich zu dem Experiment und zu *-BLC-PANS*, wo das PKW-Totwasser zu der Kanalströmung geneigt ist, hat das Totwasser bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* einen mehr symmetrischen Charakter. Der LKW-Nachlauf wird weiter von dem PKW-Nachlauf gespeist. Auf das LKW-Totwasser hat dies aber keine direkte Wirkung; das Totwasser verkleinert sich wieder und nimmt eine symmetrische Form an. Bei *-slip-PANS* sind wie in vorheriger Position zwei kleinere abschwimmende Oberkantenwirbel und ein kleiner angelegter Unterkantenwirbel zu sehen. Bei dieser Position stellt die PKW-Seite eine Barriere für das LKW-Staugebiet dar und die positive LKW-Seitenkraft c_s kulminiert. Umgekehrt hat das LKW-Staugebiet auf den PKW die stärkste Wirkung bei der Position $x/L = 0,77$. Dadurch erreicht hier auch die PKW-Seitenkraft c_s ihr negatives Maximum. Der PKW steht bei dieser Position komplett vor dem LKW, womit die ganze rechte PKW-Seite dem Hochdruckgebiet ausgesetzt ist, und einen höheren Druck als die linke Seite aufweist (siehe Bild 6.16). Die Kanalströmung löst sich langsam auf; eine Strömungsbeschleunigung entsteht zwischen der LKW-Front und dem PKW-Heck. Die Stromlinien weichen seitlich mehr dem LKW aus. Die Stromlinien aus dem PKW-Nachlauf fließen weiter Richtung LKW-Nachlauf. Im PKW-Totwasser erfolgt ein Druckanstieg, der dieses verkleinert. Die rechte Seite ist davon mehr betroffen als die linke (siehe Bild 6.12). Bei *-BLC-PANS* kommt es zum Strömungsrichtungswechsel im PKW-Totwasser. Die *-slip-PANS* und *-move-PANS* bilden das PKW-Totwasser mehr symmetrisch ab und es ist immer zum LKW geneigt. Die Interaktion zwischen dem PKW-Totwasser und dem LKW-Staugebiet ist bei *-move-PANS* an den Stromlinien gut sichtbar. Sie fließen aus dem Hochdruck- in das Tiefdruckgebiet. Das PKW-Totwasser wirkt auf die linke LKW-Seite und verursacht bei dem LKW ein lokales Maximum der positiven Seitenkraft c_s . Das LKW-Totwasser steht nicht mehr unter dem Einfluss des PKWs. Der LKW-Nachlauf ist immer mit dem PKW-Nachlauf verbunden. Mit wachsender Entfernung des PKWs und zu dem LKW dämpft sich die gemeinsame Interaktion wieder ab. Bei der letzten Position $x/L = 1,17$ wirkt das LKW-Staugebiet auf die linke und rechte Seite des PKWs mehr gleichmäßig. Die Druckdifferenz zwischen der rechten und linken PKW-Seite neutralisiert sich (siehe Bild 6.16). Die Stromlinien in dem PKW-Nachlauf sind bei *-BLC-PANS* von dem LKW mehr abgeneigt als die bei *-slip-PANS*. Das deutet auf eine stärkere Wirkung des LKW-Staugebietes auf die Umströmung bei der Simulation *-BLC-PANS* hin. Davon ist auch das PKW-Totwasser betroffen, das bei *-BLC-PANS* nach links geneigt ist, während es bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* in die andere Richtung neigt – dorthin, wo die Strömung zwischen den Fahrzeugen beschleunigt wird. Dementsprechend verläuft auch die Druckverteilung am Heck (siehe Bild 6.12). Die stärkere Rezirkulationszone rechts bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* erzeugt einen größeren Druck. Links ist der Druck wegen der Strömungsbeschleunigung niedriger. Umgekehrt verläuft es dann bei *-BLC-PANS* und bei dem Experiment im Windkanal. Diese Differenz ist auf den dynamischen Vorgang zurückzuführen, bei dem die Wirkung des LKW-Staugebietes schwächer ausgeprägt ist. Eine Zusammenwirkung zwischen dem LKW-Staugebiet und dem PKW-Nachlauf zeigen wieder die Stromlinien bei *-move-PANS*, die aus dem Hochdruckgebiet in das Tiefdruckgebiet fließen und senkrecht auf das Heck eintreffen.



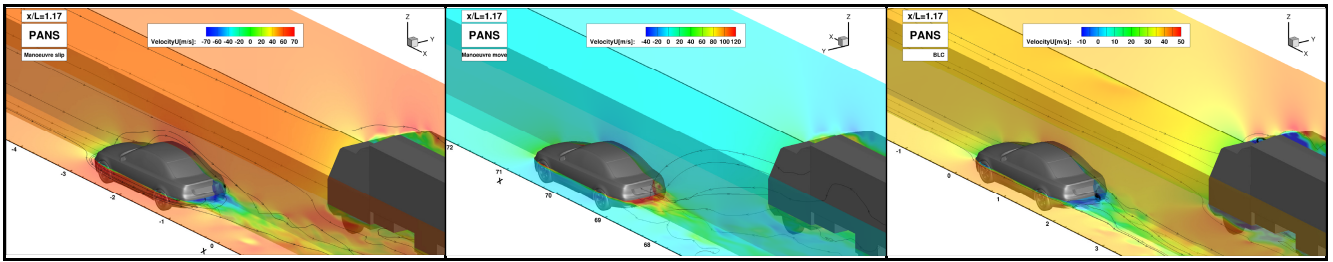


Bild 6.21: Vergleich der Totwässer des PKWs und LKWs beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-* und *RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-* Simulationen in allen Positionen der Überholung.

Die bisherige Strömungsbeschreibung wurde auf den Druck und die Geschwindigkeit begrenzt. Um die Strömung an den Karosserieteilen und in den Totwässern und Nachläufen noch besser visualisieren zu können, werden die Wirbelstrukturen durch das Q -Kriterium, das das lokale Gleichgewicht zwischen Rotation und Scherung in allen Raumrichtungen beschreibt, dargestellt. Das Bild 6.22 zeigt eine Iso-Fläche des Q -Kriteriums mit dem Wert $Q = 5000s^{-2}$, das mit der Geschwindigkeitskomponente u gefüllt ist. Bei dieser Abbildung handelt es sich um eine Momentaufnahme, bei der beide Größen nichtgemittelte, augenblickliche Werte darstellen.

Bevor auf die Beschreibung der einzelnen Positionen eingegangen wird, wird die Umströmung des PKWs und des LKWs, die aus dem Bild 6.22 abgelesen werden kann, allgemein diskutiert.

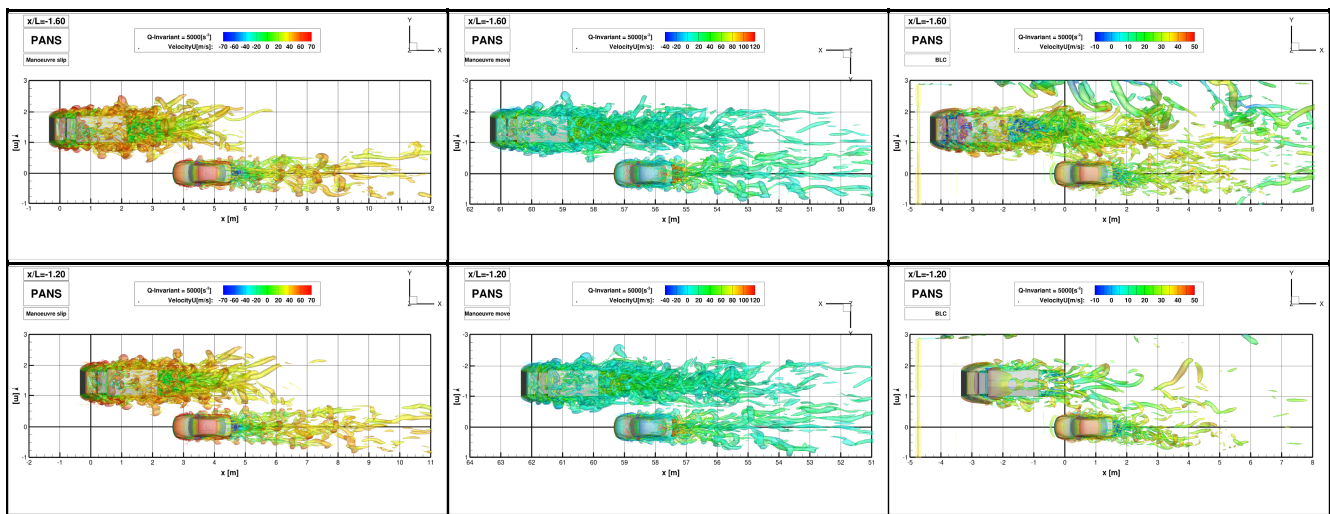
An den Ablösekanten, die senkrecht zur Strömungsrichtung liegen, lösen sich Querwirbel ab, deren Achse ebenso senkrecht zur Anströmung verläuft. Solche Wirbel entstehen beim PKW im Windlauf, in dem Totwasser am Heck, hinter den Seitenspiegeln und den Rädern. Die Querwirbel am Heck bilden zusammen einen Ringwirbel, der periodisch als spiralförmiger Wirbel in den Nachlauf abschwimmt. An den zur Strömung schrägen Kanten bilden sich Ablösungen mit wesentlicher Geschwindigkeitskomponente parallel zur Wirbelachse. Somit entstehen dreidimensionale Längswirbel. Auf dem PKW bilden sich solche Längswirbel an den A- und C-Säulen und zwischen den C-Säulenwirbeln, wo sich, aus auf dem Dach abgelöster Strömung, ebenso ein Längswirbelpaar auf der Heckscheibe bildet. Ein Hufeisenwirbel entsteht beim Bodenkontakt der vorderen Räder. Hinter den Seitenspiegeln entstehen so genannte Wirbeltüten.

Die kantige Oberfläche des LKWs bietet zahlreiche Möglichkeiten für große Ablösungen. Vor allem an den Seiten und auf dem Dach des Führerhauses kommt es zu großen Ablösungen in Form der Querwirbel. Weitere Querwirbel bilden sich in den Ablösungen auf dem Luftleitschild und auf dem Aufbau. Aus den Ablösungen an den Heckkanten entsteht wieder ein Ringwirbel im Totwasser. Die nächsten Ablösungen entstehen wieder an den Rädern und auf dem Unterboden.

Bei allen drei Simulationen *-slip-PANS*, *-move-PANS* und *-BLC-PANS* gelingt es PANS, dank der direkten Teilauflösung der Strömung, die Strömungsabläufe in Übereinstimmung mit der Theorie und Realität darzustellen und auch die Feinstrukturen abzubilden.

Bei der ersten Position $x/L = -1,60$ ist bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* in dem PKW-Nachlauf rechts mehr Aktivität als links zu sehen. Bei *-BLC-PANS* ist im Gegensatz dazu deutlich, wie sowohl das PKW- als auch das LKW-Nachlauf nach links geneigt sind. In dem PKW-Nachlauf von *-slip-PANS* dominieren spiralförmige Wirbel, die aus dem Ringwirbel im Totwasser entstanden sind, und Wirbelstrukturen, die bei der Umströmung der Räder generiert wurden. Der LKW-Nachlauf ist bei *-move-PANS* für diesen Wert des Q -Kriteriums stärker entwickelt. Die Interaktion der beiden Nachläufe ist in dieser Position noch gering. Bei der nächsten Position $x/L = -1,20$ schwimmt bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* immer mehr Längswirbel nach rechts Richtung LKW-Nachlauf als nach links. Die Interferenz des LKWs mit dem Windkanal bei *-BLC-PANS* biegt die Nachläufe weiter in die andere Richtung. Das PKW-Staugebiet wirkt auf das LKW-Totwasser: Durch das Hochdruckgebiet wird auf der linken Seite des LKW-Totwassers die Wirbelintensität unterdrückt und die Wirbelstrukturen verbogen. Weil das PKW-Staugebiet im Vergleich zu dem des LKWs wesentlich kleiner ist, ist der Einfluss auf das LKW-Totwasser geringer als später umgekehrt die Wirkung des LKW-Staugebietes auf das PKW-Totwasser. Die PKW- und LKW-Nachläufe bei *-BLC-PANS* verbleiben auch bei der Position $x/L = -0,80$ weiter deformiert und leicht nach links geneigt. Die beiden Nachläufe fangen an zu interagieren. Die Wirbelstrukturen aus dem schwächeren PKW-Nachlauf fließen in Richtung des stärkeren LKW-Nachlaufs. Bei den Simulationen *-slip-PANS* und *-move-PANS* ist der PKW-Nachlauf in die Richtung des LKW-Nachlaufs

geneigt. Der Saugeffekt der Kanalströmung und des LKW-Totwassers beschleunigt die Wirbelstrukturen, die sich an dem Führerhaus ablösen und entlang der linken LKW-Seite verlaufen. Die Unterdruckgebiete von den PKW- und LKW-Nachläufen interagieren bei der Position $x/L = -0,40$ am stärksten; dadurch vergrößern sich die beiden Nachläufe und neigen sich zueinander. Als Resultat der Zusammenwirkung der beiden Fahrzeuge lassen sich Wirbel, die entlang der linken LKW-Seite fließen, wie sie in das PKW-Totwasser angesaugt werden, und die Längswirbel, die sich an der rechten PKW-Seite ablösen und Richtung LKW-Nachlauf abschwimmen, beobachten. Die stärkste Interaktion zwischen den PKW- und LKW-Staugebieten findet bei der Position $x/L = 0,00$ statt. Durch diese Zusammenwirkung werden die Ablösungen an der PKW- und LKW-Front und die Wirbelgenerierung zwischen den beiden Fahrzeugen unterdrückt. Die beiden Nachläufe interagieren weiter intensiv, sind zueinander geneigt und vergrößern sich weiter. Die Längswirbel entstehen mehr an der rechten Seite des PKWs als auf der linken, wo sie deutlich schwächer ausgeprägt sind. Bei *-BLC-PANS* entstehen sie ausschließlich auf der rechten Seite und schwimmen in Richtung des LKW-Nachlaufs ab. Die Position $x/L = 0,39$ ist die Stelle der stärksten Wirkung des LKW-Staugebietes auf den PKW. Das Hochdruckgebiet unterdrückt die Wirbelgenerierung an der rechten PKW-Seite und zwischen den Fahrzeugen. Beide Nachläufe wachsen weiter an, vor allem der LKW-Nachlauf, weil er aus dem PKW-Nachlauf gespeist wird. Die Längswirbel an der rechten PKW-Seite vermischen sich mit den Wirbeln an der linken Seite des LKWs. Die Unterschiede in der Abbildung des PKW-Nachlaufs zwischen *-slip-PANS*, *-move-PANS* und *-BLC-PANS* resultieren aus der unterschiedlichen Randbedingung an der Fahrbahn. Bei den Simulationen *-slip-PANS* und *-move-PANS* ohne Haftbedingung an der Wand ist die Intensität der Strömungsablösungen an den Rädern und somit die Menge der abschwimmenden Längswirbel deutlich stärker ausgeprägt. Im Gegensatz dazu zeigt sich der PKW bei *-BLC-PANS* mehr empfindlich auf die Zusammenwirkung und somit weicht der PKW-Nachlauf und das Totwasser stärker nach rechts aus. Das LKW-Staugebiet und die Kanalströmung setzen ihre Wirkung weiter bei der vorletzten Position $x/L = 0,77$ durch. Vor allem das Hochdruckgebiet unterdrückt weiterhin wesentlich die Wirbelentstehung an der rechten PKW-Seite und verkleinert die Wirkung der Kanalströmung zwischen den Fahrzeugen. So nimmt der PKW-Nachlauf wieder eine mehr symmetrische Form an. Die Interaktion der beiden Nachläufe schwächt sich ebenso ab. Der starke Saugeffekt von dem LKW-Totwasser entfernt sich von dem PKW-Totwasser bzw. Nachlauf. Dadurch verkleinern sich wieder die Nachläufe, obwohl der LKW-Nachlauf weiter von dem PKW-Nachlauf gespeist wird. Wie schon bei den vorherigen Positionen reagiert der PKW bei *-BLC-PANS* sensibler auf das Hochdruckgebiet aus dem LKW. Durch den Hochdruck, der auf den PKW bei der letzten Position mehr von hinten auftrifft, wird bei *-BLC-PANS* der PKW-Nachlauf in die andere Richtung, das heißt nach links, umgelenkt. Bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* bleibt der PKW-Nachlauf jedoch in Richtung der restlichen schnelleren Kanalströmung geneigt. Hier interagiert die rechte Nachlaufseite des PKWs auch stärker mit den Wirbeln, die sich an dem LKW-Führerhaus ablösen, und entlang der linken LKW-Seite verlaufen. Diese starke Interaktion der Wirbelstrukturen die mit einer Strömungsverlangsamung einhergeht, ist vermutlich für die erhöhte positive LKW-Seitenkraft c_s bei diesen Simulationen verantwortlich. Die Totwasser und Nachläufe kehren langsam zur Symmetrie und zu normaler Größe zurück.



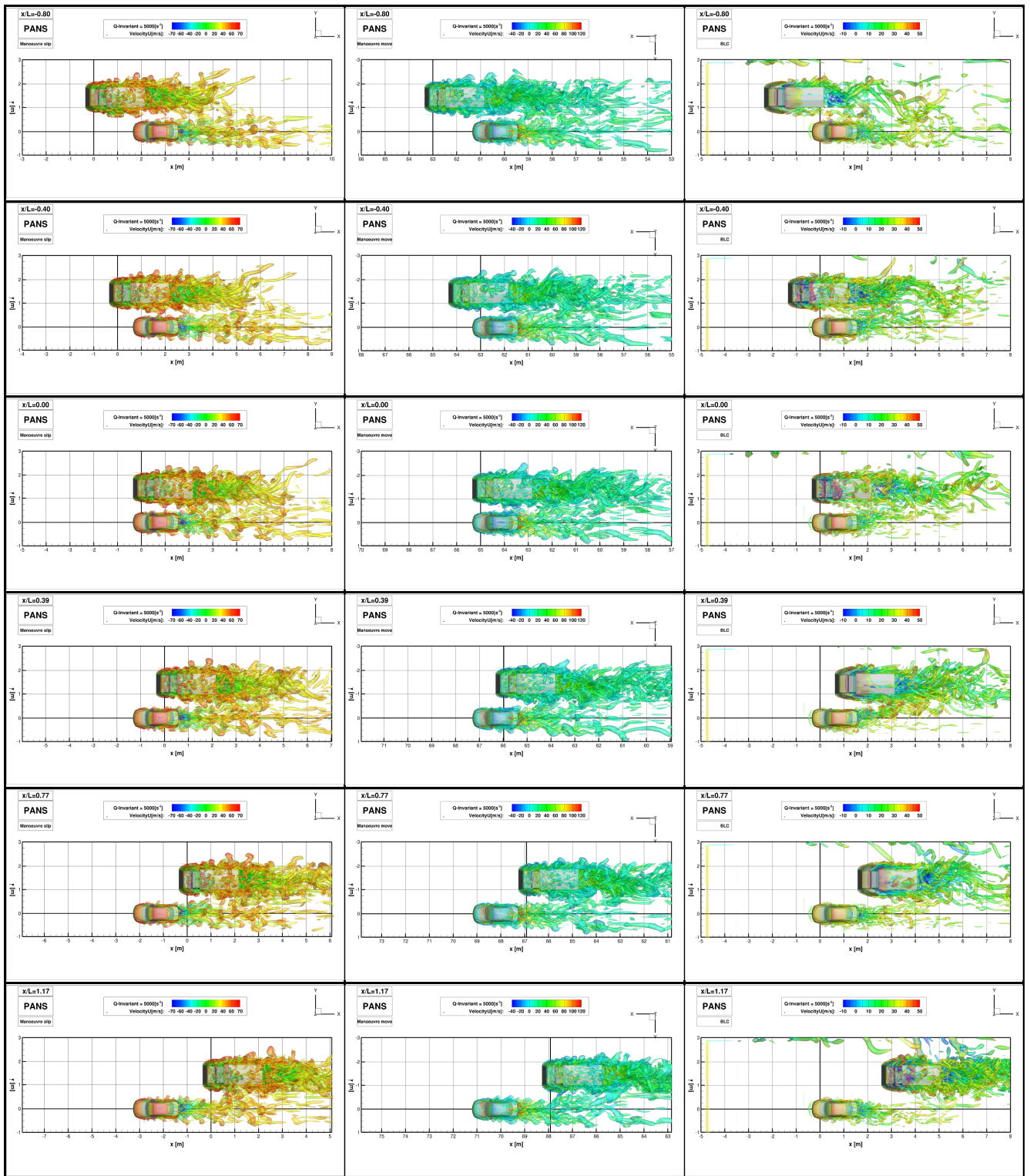


Bild 6.22: Vergleich der Strukturen des augenblicklichen Q -Kriteriums durch augenblickliche U -Geschwindigkeit gefüllt beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-* und *RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-* Simulationen in allen Positionen der Überholung.

In Bezug auf das Q -Kriterium wird wieder die Studie der zeitlichen Diskretisierung zur Diskussion herangezogen (siehe Bild 6.23). Sie findet anhand der Simulation *-slip-PANS* statt und beinhaltet drei Zeitschritte: $\Delta t = 0,0001s$, $\Delta t = 0,00025s$ und $\Delta t = 0,0005s$. Bei der Analyse der Luftwiderstandsbeiwerte c_d , c_s und c_l wurde beobachtet, dass der grobe Zeitschritt größere und längere Oszillationen und der kleine Zeitschritt feinere und kürzere Oszillationen aufweist. Zusätzlich können die Verläufe der Luftwiderstandsbeiwerte und der Momentenbeiwerte c_{M_x} , c_{M_y} und c_{M_z} durch einen größeren Zeitschritt vor allem gedämpft, aber auch ihre Maxima und Minima überschätzt werden. Diese Beobachtung spiegelt sich in

den durch das Q -Kriterium abgebildeten Wirbelstrukturen wieder. Bei *-slip-PANS* mit $\Delta t = 0,0005s$ entsteht es weniger Verwirbelungen, die aber stärker angewachsen sind. Durch die Zeitschrittverfeinerung auf $\Delta t = 0,00025s$, bzw. $\Delta t = 0,0001s$ bildet es sich immer mehr Feinstrukturen, die schwächer sind. Die geringere Anzahl der Wirbelstrukturen bei dem groben Zeitschritt verursacht die Dämpfung der wirkenden Kräfte und Momente auf die Fahrzeugoberfläche. Gleichzeitig führt die Darstellung der vergrößerten Wirbel zur Überschätzung ihrer Wirkung auf das Fahrzeug. Bei dem Zeitschritt $\Delta t = 0,0005s$ tritt in der angelegten Umströmung und im Totwasser deutlich weniger Verwirbelungen auf. In den für die Entstehung der Luftwiderstände und Momente relevanten Bereichen bildet sich dann bei den Zeitschritten $\Delta t = 0,00025s$, $\Delta t = 0,0001s$ mehr Wirbelstrukturen. In Übereinstimmung mit den Verläufen der Luftwiderstände und Momente erweist sich der Zeitschritt $\Delta t = 0,0005s$ wieder als ungeeignet. Dank der Darstellung der Ablösungen auf dem Fahrzeug und im Totwasser wird der Zeitschritt $\Delta t = 0,00025s$ als akzeptabel angesehen. Der Zeitschritt $\Delta t = 0,0001s$ bringt die akkuratesten Ergebnisse, bei dem auch die Wirbel im PKW- und LKW-Nachlauf genauer abgebildet werden.

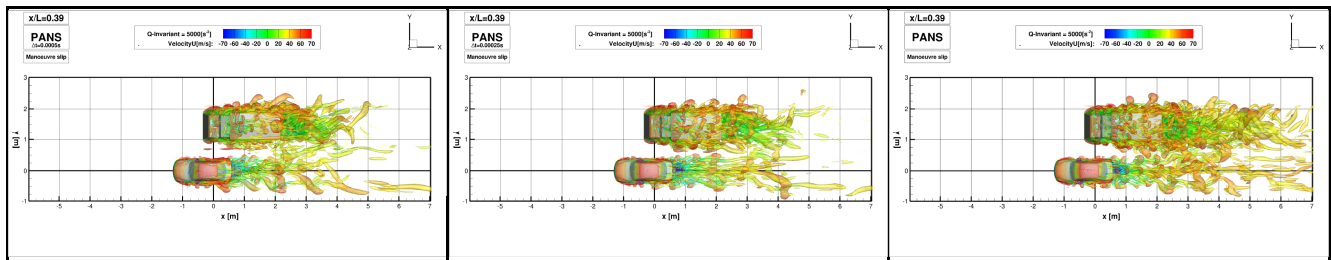


Bild 6.23: Vergleich der Strukturen des augenblicklichen Q -Kriteriums durch augenblickliche U -Geschwindigkeit gefüllt beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip-rot*- Simulationen mit unterschiedlichen Zeitschritten in der Position $x/L = 0,39$ als Zeitschrittstudie.

Als Nächstes folgt wieder die Betrachtung der Turbulenz und der Gitterqualität bei allen drei Simulationen: *-slip-PANS*, *-move-PANS* und *-BLC-PANS*. Sie erfolgt nur in der kritischsten Position $x/L = 0,39$ mit dem höchsten PKW-Luftwiderstand c_d und den meisten Verwirbelungen.

Der Turbulenzgrad beschreibt die turbulente kinetische Energie und die Dissipationsrate. Bei der Darstellung der turbulenten kinetischen Energie handelt es sich bei diesen drei PANS Simulationen um eine nichtgemittelte totale turbulente kinetische Energie, die auf dem Bild 6.24 in den Zentralebenen des PKWs und des LKWs aufgetragen ist. Bei PANS besteht die totale turbulente kinetische Energie aus dem aufgelösten und dem nichtaufgelösten Anteil. Bei der Betrachtung der Momentaufnahme sind bei *-slip-PANS* die Spuren des Ringwirbels, der sich aus den Querwirbeln am Heck des PKWs im Totwasser bildet und als spiralförmiger Wirbel in den Nachlauf wegschwimmt, sichtbar. Bei der Simulation *-move-PANS* entstehen in dem PKW-Nachlauf größere energietragende Strukturen. Eine zusätzliche starke Aktivität bildet sich an der Heckscheibe, die dort auf die Präsenz des Haarnadelwirbels hindeutet. Im weiteren Vergleich mit *-slip-PANS* zeigt der Bereich des Windlaufs auch eine höhere turbulente kinetische Energie. Die niedrigere Anströmgeschwindigkeit in *-BLC-PANS* liefert aus dem Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit und der turbulenten kinetischen Energie nach $k = \frac{1}{2}(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})$, beim Einhalten einer einheitlichen Skala, ebenso eine niedrigere turbulente kinetische Energie. Die Strömungskinematik sieht aber ähnlich aus. Die Ablösungen, die an der Heckklappenkante und der unteren Stoßstangenkante des PKWs entstehen, lösen sich periodisch in das Totwasser ab und schwimmen in den Nachlauf weg. Die Strömungsabbildung ist durch die turbulente kinetische Energie bei dem LKW bei allen drei Simulationen ähnlich. Die energietragenden Wirbelstrukturen entstehen vor allem aus den Ablösungen, an der Ober- und der Unterkante am Heck, die als starke Wirbel in den Nachlauf abschwimmen und lang ihre Energie behalten; aber auch nach der Ablösung auf der Dachkante auf dem Aufbau, auf dem Führerhaus und dem Luftleitschild.

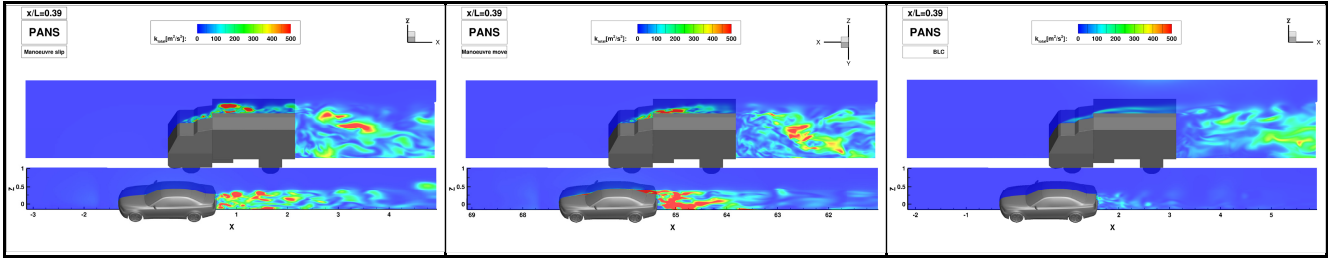


Bild 6.24: Vergleich der augenblicklichen totalen turbulenten kinetischen Energie im PKW- und LKW-Längsmittelschnitt beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-* und *RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-* Simulationen in der Position $x/L = 0,39$.

Nachdem die Wirbel entstehen, an turbulenter kinetischer Energie gewinnen und dadurch anwachsen, verlieren sie sie mit der Zeit wieder und dissipieren in immer kleinere Wirbelstrukturen bis auf die Wärme. Diese Dissipationsrate, die auf dem Bild 6.25 dargestellt ist, beschreibt, wie intensiv die Wirbelstrukturen zerfallen. Im Vergleich zu *-slip-PANS* und *-move-PANS* ist bei einer einheitlichen Skala die Dissipation bei *-BLC-PANS* zirka um den Faktor 100 stärker. Das ist auf den unterschiedlichen Zeitschritt bei diesen Simulationen zurückzuführen. Aus der Strömungskinematik ergibt sich, dass die Querwirbel, die sich an den zur Strömung senkrechten Kanten bilden, relativ schnell dissipieren. Dies beweist auch die erhöhte Dissipationsrate im Totwasser, hinter der Dachkante und im Windlauf beim PKW. Stark dissipierende Querwirbel entstehen bei dem LKW vor allem auf der Dachkante des Führerhauses, dem Luftleitschild, der Aufbaukante und, dank den Ablösungen auf der Ober- und Unterkante des Aufbaus, im Totwasser. Beim Vergleich der beiden Simulationen mit bewegten Gittern, bildet sich bei *-move-PANS*, aufgrund der niedrigeren Verwirbelung der Strömung, auch weniger Dissipation als bei *-slip-PANS*.

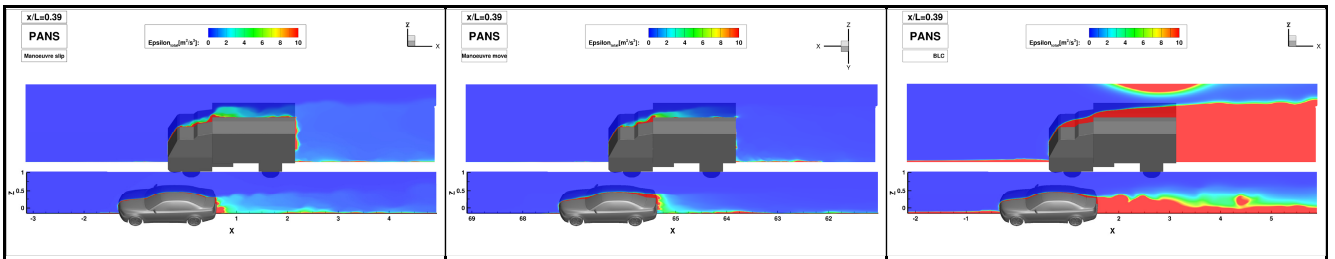


Bild 6.25: Vergleich der augenblicklichen Dissipationsrate im PKW- und LKW-Längsmittelschnitt beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-* und *RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-* Simulationen in der Position $x/L = 0,39$.

Der Parameter, der bei diesen PANS Simulationen entscheidet, zu welchem Teil die Strömung aufgelöst bzw. simuliert wird, stellt der sogenannte f_k Parameter dar. Der f_k Parameter beschreibt das Verhältnis der nichtaufgelösten zu der totalen turbulenten kinetischen Energie: $f_k = k_u/k_{tot}$. In dem Turbulenzmodell wird der f_k Parameter in Bezug auf die Gittergröße, die totale turbulente kinetische Energie und auf die nichtaufgelöste Dissipationsrate wie folgt definiert:

$$f_k \geq \frac{1}{\sqrt{C_\mu}} \left(\frac{\Delta}{\Lambda} \right)^{2/3}, \quad \Lambda = \frac{k_{tot}^{3/2}}{\varepsilon_u} \quad (6.1)$$

Somit ist der f_k Parameter während der Berechnung ein dynamischer Parameter, der an Ort und in Zeit zwischen $0 \leq f_k \leq 1$ variiert. Wenn $f_k = 1$ ist, dann wird die Strömung komplett durch das $k - \varepsilon - \zeta - f$ Turbulenzmodell modelliert. Bei $f_k = 0$ werden die Navier-Stokes-Gleichungen wie bei DNS direkt aufgelöst.

Auf den Bildern Bild 6.26 und Bild 6.27 ist f_k zuerst als Formulierung des PANS Turbulenzmodells und anschließend als Verhältnis zwischen k_u und k_{tot} präsentiert. Durch den Vergleich der beiden Definitionen wird nachgewiesen, wie weit das im Turbulenzmodell vorhergesagte f_k durch die Erfassung der Geschwindigkeitsfluktuationen, die die aufgelöste turbulente kinetische Energie bilden, in den einzelnen Zellen unterstützt wird.

Das Bild 6.26 fokussiert sich auf die Verteilung des f_k Parameters in den Nachläufen des PKWs und des LKWs und zeigt seine Werte in der Momentaufnahme auf den Zentralebenen $y = 0m$ und $y = 1,432m$. Dank der niedrigeren Dissipation bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* erreicht f_k hier niedrigere Werte als im Fall des -

BLC-PANS. Ein leicht erhöhtes f_k bleibt in der Scherschicht von beiden Fahrzeugen und bei den Querwirbeln, das heißt, an Stellen mit stärkerer Dissipation. Die Randbedingung an der Fahrbahn bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* verhindert die Entstehung der Grenzschicht, die mit stärkerer Dissipation verbunden ist, und im Gegensatz zu *-BLC-PANS* nimmt f_k in der Nähe von der Fahrbahn vor den beiden Fahrzeugen ebenso kleinere Werte an.

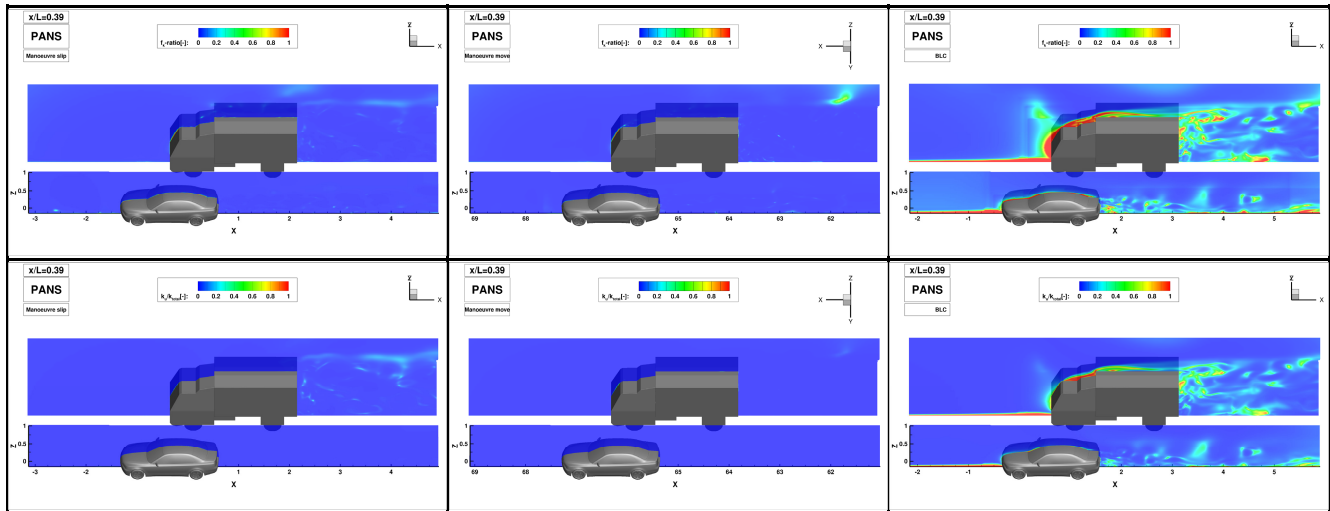


Bild 6.26: Vergleich des f_k Parameters mit dem Verhältnis k_u durch k_{tot} in der Fahrzeughöhe beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-* und *RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-* Simulationen in der Position $x/L = 0,39$.

Das nächste Bild 6.27 zeigt eine Übersicht über die komplette Rechendomäne in der PKW-Zentralebene $y = 0m$. Es handelt sich wieder um augenblickliche Werte. Vereinfacht lässt sich behaupten, dass wenn die Dissipation größer als die turbulente kinetische Energie ist, was in der freien Strömung der Fall ist, dann ist der f_k -Wert der Gleichung nach hoch. Andererseits erreicht f_k , wenn die turbulente kinetische Energie über die Dissipation überwiegt, einen niedrigeren Wert. Diese Bereiche sind meistens dort, wo die Strömung durch ein Hindernis gestört wird und dort wo Ablösungen und Wirbel entstehen. Beim PKW bedeutet dies konkret die nahliegende Umströmung, die Ablösungsgebiete, das Totwasser und den Nachlauf. Unterstützt wird dies auch durch die Gitterweite, indem ein feines Gitter mehr Turbulenz abbilden kann als ein grobes. Dieses Verhalten erklärt auch die f_k -Verteilung bei *-slip-PANS* und *-move-PANS*. Die groben Zellen und die größere Dissipation im Vergleich zur turbulenten kinetischen Energie haben zur Folge, dass in dem vorderen Teil der Rechendomäne f_k hoch und die Strömung überwiegend modelliert wird. Durch die steigende turbulente kinetische Energie bei der Fahrzeugumströmung, die mehrfach größer als die Dissipation ist, und durch die Unterstützung der feinen Zellen, nimmt der f_k Parameter im Bereich *CAR_moving* sehr kleine Werte an. Die Strömung wird in dem relevanten Bereich wie gewollt überwiegend aufgelöst. Im Nachlauf dissipieren die energietragenden Wirbelstrukturen; deswegen mischt sich dort die Auflösung mit der Modellierung der Strömung. Oberhalb in dem hinteren Teil der Rechendomäne ist die Dissipation proportional der turbulenten kinetischen Energie. Hier wird durch die größere Gitterweite der Zähler in der Gleichung trotzdem größer und somit nimmt f_k wieder höhere Werte an.

Die Formulierung des f_k Parameters als Verhältnis der nichtaufgelösten zu der totalen turbulenten kinetischen Energie zeigt bei allen drei Simulationen in der ganzen Domäne überwiegend niedrigere Werte als das durch das Turbulenzmodell vorhergesagte f_k . Wenn das Verhältnis niedriger ist, ist zugleich der Anteil der aufgelösten turbulenten Energie höher. Das bedeutet, dass auf den angewandten Gittern tatsächlich mehr aufgelöst wird als durch das Turbulenzmodell abgeschätzt wurde. Für die Bestimmung der Längenskala in der f_k -Gleichung ist die totale kinetische Energie nötig, deren aufgelöster Anteil aus der Mittelung des Geschwindigkeitsfeldes gewonnen wurde. Im Fall eines bewegten Gitters, wo es zur Gitteränderung kommt, kann dies kritisch sein. Dies könnte die Erklärung für die erhöhte Modellierung bei *-slip-PANS* in dem hinteren Teil sein, in dem sich die Zellen dehnen. Dabei vergrößert sich ihre Gitterweite ständig, womit die Mittelung gestört wird.

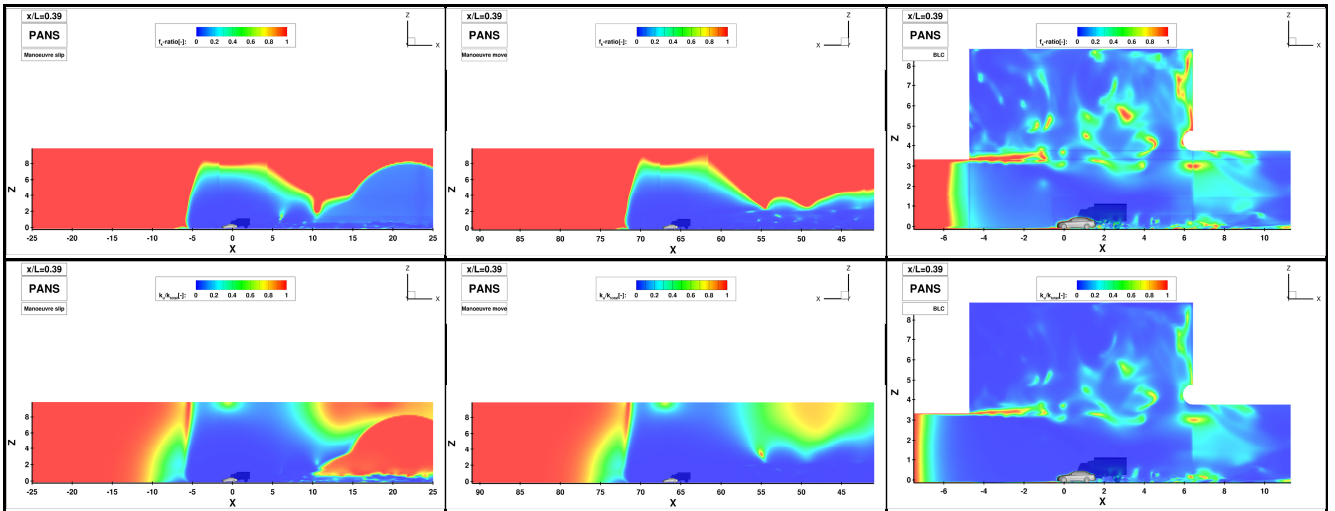
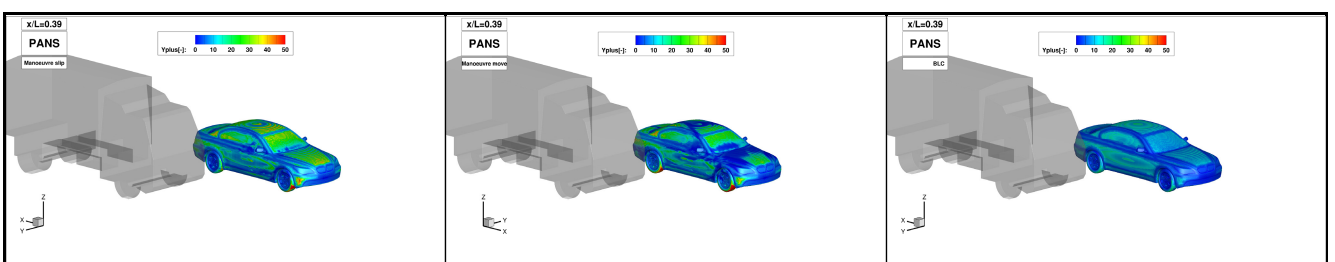


Bild 6.27: Vergleich des f_k Parameters mit dem Verhältnis k_u durch k_{tot} in gesamter Domäne beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip-rot- / move-rot- und RealCar_n_Truck-Wheels-BLC- Simulationen* in der Position $x/L = 0,39$.

Anschließend wird die Genauigkeit der Berechnung betrachtet. Als erstes wird die Gitterqualität auf der Oberfläche mittels des dimensionslosen Wandabstands y^+ festgestellt. Auf dem Bild 6.28 wird die PKW- und LKW-Oberfläche bei allen drei Simulationen *-slip-PANS*, *-move-PANS* und *-BLC-PANS* wieder in der Position $x/L = 0,39$ gezeigt. Die Gitterauflösung an den Fahrzeugoberflächen ist bei allen drei Simulationen identisch; jedoch ist durch die größere simulierte Geschwindigkeit der y^+ -Wert bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* generell größer als bei *-BLC-PANS*. Wegen der schwächeren Interaktion der beiden Fahrzeuge, sind die Geschwindigkeiten bzw. das y^+ an den zugewandten Seiten bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* niedriger. Nach der Definition des dimensionslosen Wandabstandes: $y^+ = \frac{\rho \bar{u}_\tau y}{\mu}$ steigt dieser mit der Strömungsgeschwindigkeit und mit zunehmender Gitterweite der ersten Zellschicht. Die Strömung wird an den Abrundungen am meisten beschleunigt: Zum Beispiel beim PKW auf den Rädern, dem Dach, der Krümmung der Motorhaube, der Frontschürze und der C-Säule, wo die Maximalwerte zwischen $y^+ \approx 30 - 60$ erreichen. Die höheren Werte entstehen vor allem an den geraden Flächen, wo die Gitterverfeinerung gröber als auf den Kanten ist. Bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* ist der Wert beim PKW dort ungefähr $y^+ \approx 20$. Damit der erste Zellmittelpunkt in der viskosen Unterschicht liegt und somit die Grenzschicht so gut wie möglich abgebildet wird, wurde an den kritischen Stellen, sprich an den Krümmungen und Kanten, das Gitter verfeinert, sodass das $y^+ < 5$ bleibt. Auf den Hinterseiten der Räder wird die Strömung mitgeschleppt und im Fall von *-move-PANS*, bei dem keine Gegenströmung aus dem Einlass vorhanden ist, entsteht ein großer Gradient gegen die ruhende Luft und somit steigt das y^+ dort auf $y^+ \approx 60$ an. Die Strömungsbeschleunigung auf dem LKW hat zur Folge, dass das y^+ auf dem Führerhaus, dem Luftleitschild und auf dem Dach des Aufbaus $y^+ \approx 30$ beträgt. Auf dem Unterboden gehen die Höchstwerte in dem vorderen Bereich gegen $y^+ \approx 60$. Auf der LKW-Oberfläche ohne Strömungsbeschleunigung bleibt das $y^+ < 5$; dadurch ist der erste Zellmittelpunkt wieder in der viskosen Unterschicht positioniert. Die ersten Zellmittelpunkte, deren Werte zwischen $5 \leq y^+ \leq 30$ liegen, befinden sich in der Übergangsschicht. Bei $y^+ > 30$ liegt der erste Zellmittelpunkt in dem logarithmischen Bereich. Durch die hybride Wandfunktion wird in der viskosen Unterschicht bis zur Wand integriert, in dem logarithmischen Bereich die Standardwandfunktion verwendet und in der Übergangsschicht mittels einer Blendingfunktion zwischen dem Integrieren und der Standardwandfunktion geblendet.



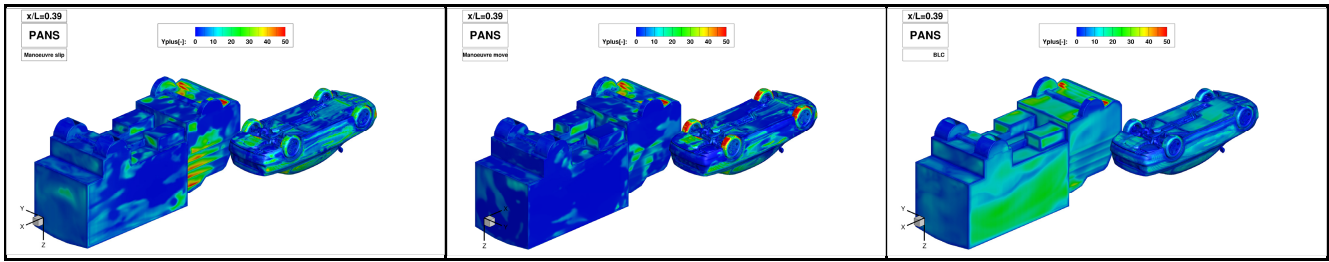


Bild 6.28: Vergleich des y^+ -Wertes auf der PKW- und LKW-Oberfläche beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-* und *RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-* Simulationen in der Position $x/L = 0,39$.

Als Nächstes wird die räumliche Gitterqualität anhand der CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) Zahl betrachtet. Die CFL-Zahl stellt fest, wie schnell sich ein Teilchen innerhalb eines Zeitschrittes in dem numerischen Gitter bewegt. Bei $CFL < 1$ bleibt das Teilchen zwischen zwei Zeitschritten innerhalb einer Zelle; bei $CFL > 1$ überspringt es zwei oder mehrere Zellen. Nach der Definition von: $CFL = \frac{u\Delta t}{\Delta x}$ erreicht die CFL-Zahl bei großer Geschwindigkeit, großem Zeitschritt und feinen Zellen ihren Maximalwert.

Das Bild 6.29 zeigt zuerst die Situation in Fahrzeugnähe auf zwei den Zentralebenen $y = 0m$ und $y = 1,432m$ mit einer einheitlichen Skala von $CFL = 0 \div 5$ und anschließend die ganze Ebene $y = 0m$ mit einer Skala von $CFL = 0 \div 1$. Durch die beim PKW 2,8-fache bzw. beim LKW 1,4-fache Erhöhung der Fahrgeschwindigkeit und die 10-fache Verkleinerung des Zeitschrittes ist die CFL-Zahl bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* generell niedriger als bei *-BLC-PANS*. Im Falle der Simulationen *-slip-PANS* und *-move-PANS* nimmt die CFL-Zahl in der Nähe der PKW-Oberfläche Werte von $CFL \approx 1,5$ an. An den ungünstigen Stellen mit feinen Zellen und einer Strömungsbeschleunigung wie zum Beispiel auf der Motorhaube, dem Windlauf, dem Dach, dem Heckspoiler und auf dem Frontdiffusor erreicht die CFL-Zahl einen Maximalwert zwischen $CFL = 5 \div 10$. Beim LKW im Bereich der angelegten Strömung, wo keine Ablösungen auftreten, erreicht die CFL-Zahl einen Wert von $CFL \approx 0,5$. Die Strömungsbeschleunigung an den Kanten mit feinen Zellen erhöht die CFL-Zahl an dem Fahrerhaus, dem Luftleitschild und dem Aufbau auf einen Wert von $CFL \approx 2,5$. Bei Betrachtung des kompletten Rechengebietes ist die CFL-Zahl deutlich $CFL < 1$. In der *FAMEH_{hexa}* Domäne und dem Nachlauf ist die $CFL \approx 0,2$. In dem restlichen Rechengebiet variiert die CFL-Zahl je nach Kompression oder Dehnung des Gitters zwischen $CFL = 0,05 \div 0,15$. Wegen Absenz der Anströmung bei *-move-PANS* liegen dort die Werte in dem Fernbereich in der 10^{-4} -Ordnung. Obwohl das in dieser Arbeit verwendete Verfahren eine implizite Zeitdiskretisierung ist, bei dem auch $CFL > 1$ zulässig ist, hat die CFL-Zahl auf die Rechenstabilität einen vernachlässigbaren Einfluss.

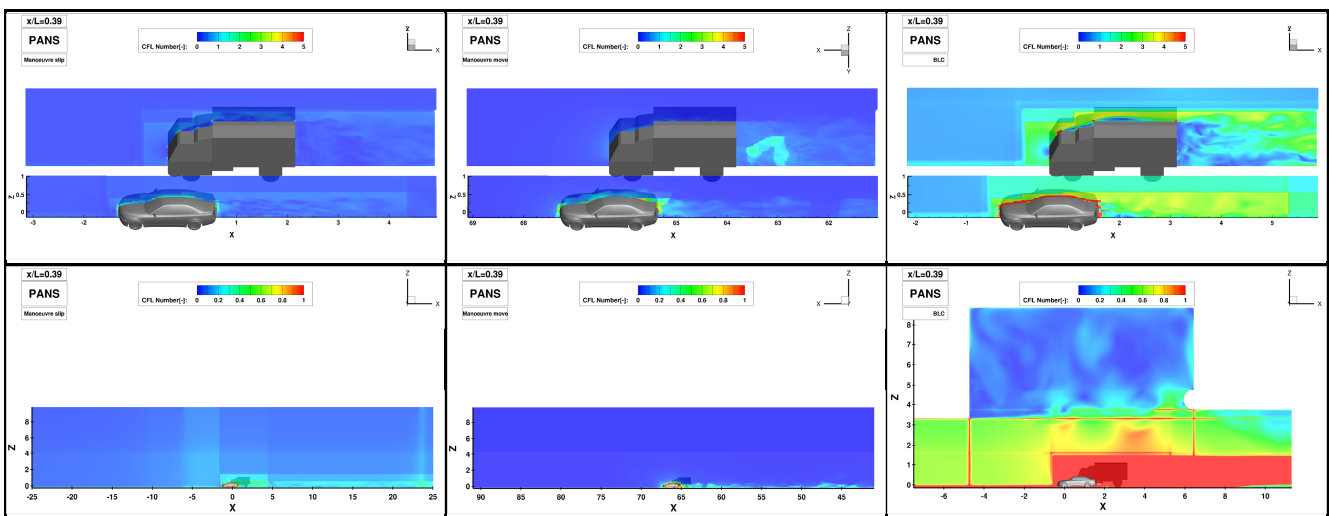


Bild 6.29: CFL-Zahl in der Fahrzeugnähe und in gesamter Domäne beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-* und *RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-* Simulationen in der Position $x/L = 0,39$.

Einen zweiten Indikator der räumlichen Gitterqualität stellt die *delta/eta* Kennzahl dar (siehe Bild 6.30). Die *delta/eta* Kennzahl sagt nach ihrer Formulierung von $\frac{\delta}{\eta} = \frac{(\Delta vol)^{1/3}}{\left(\frac{v^3}{\varepsilon}\right)^{1/4}}$, wie große Wirbelstrukturen im Verhältnis zu den kleinsten Wirbelstrukturen (Kolmogorov-Längenskala) das Gitter aufzulösen vermag. Der empfohlene Wert bei LES sollte $\frac{\delta}{\eta} < 30$ sein. Beim Vergleich mit einer einheitlichen Skala ist die *delta/eta* Kennzahl bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* deutlich niedriger als bei *-BLC-PANS*. Dies ist auf den kleineren Zeitschritt bei *-slip-PANS* und *-move-PANS* zurückzuführen, da sich dadurch die Kolmogorov-Zeitskala $\tau_\eta = \left(\frac{\eta}{\varepsilon}\right)^{1/2}$ ändert und so die Dissipation kleiner wird.

Betrachtet man weiter nur die Simulationen *-slip-PANS* und *-move-PANS* wird die unmittelbare Umgebung der beiden Fahrzeuge wieder mittels ihrer Zentralebenen $y = 0m$ und $y = 1,432m$ dargestellt. Trotz der kleinen Gitterweite in der Nähe des PKWs wird die Dissipation so groß, dass sie in der Scherschicht zu $\frac{\delta}{\eta} \approx 100$ und sowohl oberhalb des Fahrzeuges als auch im Nachlauf zu $\frac{\delta}{\eta} \approx 50$ führt. Hinten in dem Nachlauf schwächt sich die *delta/eta* Kennzahl dank der sinkenden Dissipation wieder ab und steigt später wegen der größeren Zellen wieder an. Beim LKW entsteht eine ähnliche Situation. In der Scherschicht auf dem Fahrerhaus, dem Luftleitschild und dem Aufbau steigt die *delta/eta* Kennzahl auf $\frac{\delta}{\eta} \approx 100$, in dem Nachlauf beträgt sie $\frac{\delta}{\eta} \approx 40$ und dank der größeren Zellen außerhalb der *FAME Hexa* Domäne erhöht sie sich oberhalb des Nachlaufs wieder auf $\frac{\delta}{\eta} \approx 120$. Bei Betrachtung der gesamten Rechendomäne in der Ebene $y = 0m$ der Simulation *-slip-PANS* ist deutlich, wie die Dissipation nach dem Einlass kontinuierlich abnimmt und so die *delta/eta* Kennzahl vor allem auf die Gitterfeinheit reagiert. Die *moving* Zone zusammen mit den gepressten Zellen davor und dahinter weisen die niedrigsten Werte der *delta/eta* Kennzahl von $\frac{\delta}{\eta} = 30$ auf. Nur da, wo die Dissipation durch die Anregung des PKWs erhöht wird, steigt auch die *delta/eta* Kennzahl auf Werte zwischen $\frac{\delta}{\eta} = 50 \div 100$. Im Falle der *-move-PANS* Simulation entsteht von der *delta/eta* Kennzahl ein ganz anderes Bild. Weil die Verteilung der Dissipation in der Rechendomäne mit *-slip-PANS* sehr ähnlich ist, lässt der Grund dafür auf die Berechnung der Gitterweite zurückzuführen. Es lässt sich vermuten, dass die zusätzliche Bewegung der gesamten Gitter im Raum ohne Fixkoordinaten zu einer fehlerhaften Abbildung führt.

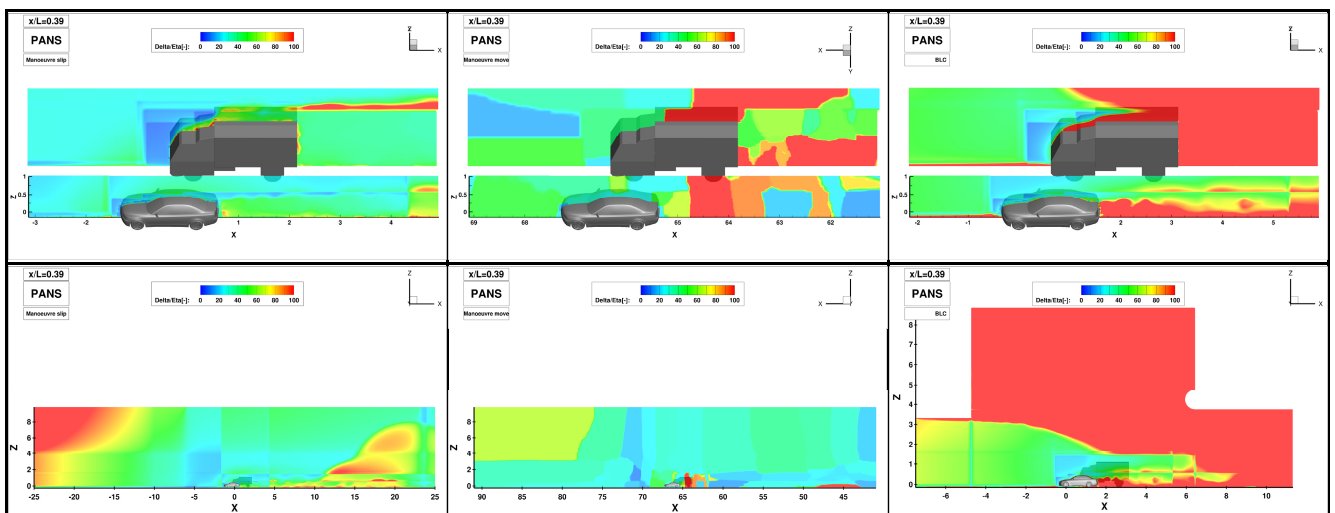


Bild 6.30: *delta/eta* Kennzahl in der Fahrzeugnähe und in gesamter Domäne beim PANS Verfahren der *Manoeuvre-slip-rot- / move-rot-* und *RealCar_n_Truck-Wheels-BLC-* Simulationen in der Position $x/L = 0,39$.

6.2.2. Computertechnische Auswertung

In diesem Kapitel wurde sowohl für die *Beginning-* als auch für die *Manoeuvre-* Simulationen in den beiden Varianten *slip* und *move* nur der *Lichtenberg-Hochleistungsrechner (ICluster)* des Hochschulrechenzentrums der Technischen Universität Darmstadt verwendet. Überwiegend wurden die Berechnungen auf den 8-

Kernprozessoren *Intel Xeon E5-2670* der *Sandy-Bridge* Mikroarchitektur durchgeführt. Weitere Details bezüglich der Rechenknoten sind in Tabelle 4.8 aufgelistet. Zusätzlich wurden auch die *Intel Xeon E5-2680 v3* der *Haswell* Mikroarchitektur mit *2,5GHz* Taktfrequenz, *3MB Level 1* und *30MB Level 2 Cache* für eine Berechnung benutzt. Diese Prozessoren besitzen *12 Kerne* und sind Teil eines *Dual CPU* Aufbaus. Die Rechenknoten bestehen also aus *24 Kernen*, verfügen über *64GB RAM* und sind durch *InfiniBand FDR-14* mit *168Gbps* Datenübertragungsrate miteinander verbunden.

Die in diesem Kapitel durchgeführten Berechnungen wurden nach *Beginning*- und *Manoeuvre*- Simulationen in den zwei Tabellen Tabelle 6.5 und Tabelle 6.6 getrennt aufgeteilt. In beiden sind dort zu jeder Berechnung die Prozessoranzahl, die Anzahl der Iterationen bei RANS bzw. die Anzahl der *Time Steps* bei URANS und PANS, die Iterationsanzahl eines *Time Steps* und die gesamte Rechenzeit eingetragen. Aus der Rechenzeit wurde für einen direkten Vergleich die Zeitdauer einer Iteration bzw. eines *Time Steps* und die Anzahl der CPU-Stunden ausgewertet. Weil es sich meistens um Simulationen mit unterschiedlicher Rechendauer handelt, wurden die CPU-Stunden zusätzlich auf CPU-Stunden von 10000 Iterationen bzw. *Time Steps* skaliert.

Für das Anlaufen der Simulation aus den Initialisierungswerten wurde bei der Varianten *slip* das RANS Verfahren benutzt. Bei der Version *move* sind nur instationäre Berechnungen möglich. In den ersten drei Zeilen in der Tabelle 6.5 bzw. den ersten zwei in der Tabelle 6.6 handelt es sich um Simulationen mit einer Grenzschicht auf der Fahrbahn, die in diesem Kapitel nicht beachtet wurden.

Tabelle 6.5: Liste von allen durchgeführten *Beginning*- Simulationen mit verwendeten Ressourcen und ihrem Rechenaufwand.

Case	Architecture	Cluster	CPUs	IT/TS	IT in TS	Sum [tt hh:mm:ss]	1 IT/TS / [s]	CPU-Hours	CPU-H 10k	
Beginning-	RANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	256	16000	1	3 21:04:00	21	23825	14891
	URANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	256	5600	10	12 09:51:29	191	76252	136164
	PANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	256	5500	15	17 04:19:45	270	105556	191920
Beginning-cut-2lc1lt-slip-	RANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	256	21606	1	4 20:37:18	19	29855	13818
	URANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	256	4514	10	9 15:10:32	184	59181	131105
	PANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	256	4500	15	13 05:54:28	254	81384	180854
Beginning-cut-2lc1lt-slip-rot-	URANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	256	4500	10	9 13:29:05	184	58748	130551
	PANS	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	256	4500	15	12 17:03:45	244	78096	173547
Beginning-cut-2lc1lt-move-	URANS_0005	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	256	2385	25	21 22:28:33	795	134778	565106
Beginning-cut-2lc1lt-move-rot-	PANS_0001	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	256	9450	25	68 06:04:49	624	419349	443755

Aus der gesamten Simulationszeit ist ersichtlich, dass die Variante *move* der *Beginning*- Simulationen deutlich länger dauert als die Variante *slip*. Dies zeigt den Mehraufwand für die Berechnung der Laplace-Differenzialgleichungen bei der Gitterbewegung. Wegen unterschiedlicher Iterationsanzahl (25 vs 15) ist ein direkter Vergleich nicht möglich, aber die Simulation *Beginning-cut-2lc1lt-move-rot-PANS*, bei der sich die gesamte Domäne bewegt, weist einen um 156% höheren Rechenaufwand auf als die Simulation *Beginning-cut-2lc1lt-slip-rot-PANS* ohne Bewegung. Einen direkten Vergleich des Rechenaufwands bieten dann die Simulationen *Manoeuvre-cut-2lc1lt-slip-rot-PANS_00025*, bei der sich die *moving Zone* bewegt, und *Manoeuvre-cut-2lc1lt-move-rot-PANS_00025*, bei der sich außer der *moving Zone* auch die gesamte Rechendomäne bewegt. Die zusätzliche Bewegung der Rechendomäne erhöht die Rechendauer nur um 7,6%. Ein interessanter Vergleich stellt der der Berechnung der Laplace-Differenzialgleichungen bei reiner Bewegung der gesamten Rechendomäne (ohne Bewegung der *moving Zone*), d. h. der Simulation *Beginning-cut-2lc1lt-move-rot-PANS_0001* mit der Berechnung der Gleichungen bei Bewegung nur der *moving Zone*, d. h. der Simulation *Manoeuvre-cut-2lc1lt-slip-rot-PANS_00025*, dar. Die Bewegung der *moving Zone*, bei der die sehr feinen Zellen um den PKW eine relative Bewegung zu der Rechendomäne aufweisen, ist bei nicht genügender Iterationsanzahl in den Laplace-Differenzialgleichungen durch Entstehung der negativen Volumina belastet. Innerhalb einer Simulation muss die Iterationsanzahl mit zunehmender Entfernung mehrmals von 100 über 250 bis auf 500 erhöht werden. Dies verursacht eine Erhöhung des Rechenaufwands um 301% im Vergleich zur Bewegung nur der kompletten Rechendomäne, bei der während der ganzen Simulation nur 100 Iteration zur Berechnung der Laplace-Differenzialgleichungen reichen.

Tabelle 6.6: Liste von allen durchgeführten *Manoeuvre*- Simulationen mit verwendeten Ressourcen und ihrem Rechenaufwand.

Case	Architecture	Cluster	CPUs	IT/TS	IT in TS	Sum [tt hh:mm:ss]	1 IT/TS / [s]	CPU-Hours	CPU-H 10k	
Manoeuvre-	URANS_0005	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	256	1462	25	14 20:51:57	879	91358	624881
	URANS_001	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	256	981	25	12 13:49:07	1108	77266	787620
Manoeuvre-cut-2lc1lt-slip-	URANS_0001	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	256	5670	25	193 19:42:33	2953	1190838	2100243
Manoeuvre-cut-2lc1lt-slip-rot-	PANS_0005	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	256	1485	25	41 02:43:10	2392	252600	1701011
	PANS_00025	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	256	2490	25	72 04:23:25	2505	443492	1781092
	PANS_0001	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2680 v3	ICluster	512	1478	25	103 10:17:34	2365	1270934	3364039
Manoeuvre-cut-2lc1lt-move-	URANS_0005	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	256	3370	25	45 02:25:26	2725	277100	1937766
Manoeuvre-cut-2lc1lt-move-rot-	PANS_00025	Intel(R) Xeon(R) CPU E5-2670	ICluster	256	2730	25	85 03:56:41	2695	523250	1916666

Fast alle *Manoeuvre*- Simulationen wurden mit gleicher Iterationsanzahl (25) innerhalb eines *Time Steps* und auf 256 CPUs des *lClusters* berechnet. So lassen sie sich gut miteinander vergleichen. Trotz dem gleichen Gitter hat die Simulation *Manoeuvre-cut-2lc1lt-slip-URANS_0001* einen um 167% höheren Rechenaufwand als die Simulation *Manoeuvre-URANS_001*. Die Ursache für die äußerst kurze Rechenzeit bei *Manoeuvre-URANS_001* ist die geringe Anzahl von *Restarts*. Bei einem Neustart wird nicht nur das *restart file* geladen, sondern auch die aktuelle Gitterverschiebung aus dem Ausgangsgitter berechnet, was zur Erhöhung des Rechenaufwands beiträgt.

Der Graf auf dem Bild 6.31 fasst alle Simulationsarten zusammen. Für einen direkten Vergleich wurden die CPU-Stunden, die auf 10000 Iterationen bzw. *Time Steps* bezogen sind, ausgewählt.

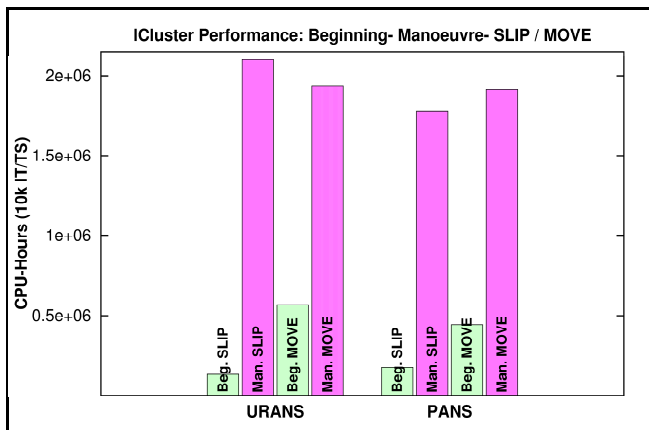


Bild 6.31: Vergleich des Rechenaufwands in Prozessorstunden bei URANS, PANS Verfahren der *Beginning- / Manoeuvre*- Simulationen auf dem *lCluster*.

Beim Vergleich der URANS und PANS Verfahren verschmiert sich der Mehraufwand bei PANS für die Mittelung des Geschwindigkeitsfeldes, der für die Bestimmung des f_k -Parameters notwendig ist, und es überwiegt der Berechnungsaufwand der Laplace-Differenzialgleichungen bei der Gitterbewegung. Den einzigen relevanten Vergleich bieten die Simulationen *Beginning-cut-2lc1lt-slip-rot-* ohne Gitterbewegung, bei denen PANS 33% Mehraufwand auch wegen der höheren Iterationsanzahl innerhalb eines *Time Step* gegenüber dem URANS zeigt. Der Graf soll grafisch den unterschiedlichen Rechenaufwand der einzelnen Gitterbewegungen, der bereits detailliert diskutiert wurde, darstellen. Die einfachste Bewegung ist die Verschiebung der gesamten Rechendomäne bei Simulationen *Beginning-cut-2lc1lt-move-*. Die Verschiebung nur von der *moving Zone* relativ zum

Rest der Rechendomäne, repräsentiert durch die *Manoeuvre-cut-2lc1lt-slip-* Simulationen, ist mit erheblichem Rechenaufwand verbunden. Die Simulationen *Manoeuvre-cut-2lc1lt-move-* sind Kombinationen von beiden Bewegungsarten und daher dauern sie am längsten. Der höchste Rechenaufwand bei der Simulation *Manoeuvre-cut-2lc1lt-slip-URANS_0001* ist nicht durch die Gitterbewegung begründet, sondern wurde durch einen *mesh quality check*, der nach jedem *Time Step* erfolgt, verursacht. Bei den anderen, vor allem bei den PANS Simulationen, wurden dann die Rechenressourcen geschont und der *mesh quality check* nur bei jedem zehnten *Time Step* durchgeführt.

Die exakte Anforderung an RAM ist auf einem Hochleistungsrechner schwer zu ermitteln. Sie variiert auch mit der benutzten Prozessoranzahl. Bei den 256 CPUs Kalkulationen war es möglich, die Simulationen nur auf den Knoten der Phase I des *lClusters* mit 64GB Arbeitsspeicher d. h. Insel-16 und -17, die aus den *Intel Xeon E5-2670* bestehen, zu starten. Für die einzige 512 CPUs Kalkulation, die auf den *Intel Xeon E5-2680 v3* Prozessoren der Phase II des *lClusters* berechnet wurde, deren Knoten über 64GB RAM verfügen, mussten wegen der Arbeitsspeicheranforderung keine 22 sondern 32 Knoten (768 CPUs) reserviert werden. Dabei sind alle Prozessoren der Knoten exklusiv reserviert, obwohl sie zu einem Drittel nicht benutzt werden. Im *AVL Fire GUI* werden 19,9GB RAM zum Öffnen des 77 Millionen Zellen Gitters und 32,7GB RAM zur Darstellung der *3D Results* benötigt.

7. Fazit

Am Anfang dieser Arbeit wurde zuerst eine Gitterstudie an einem vereinfachten 1:2,5 Modell des BMW 5er-Reihe E60 durchgeführt. In diesem Fall hatten der Luftwiderstand c_d und der Auftrieb c_l die Vergleichskriterien dargestellt. Wegen beschränkter Rechenressourcen wurde die Gitterstudie nur mittels der RANS Simulationen durchgeführt. Die RANS Simulationen waren zwar nicht in der Lage den Luftwiderstand c_d und den Auftrieb c_l qualitativ abzubilden, sie haben es aber geschafft auf die Gitterveränderungen quantitativ gut zu reagieren. Bei der Gitterstudie wurde gezeigt, dass oberhalb und unterhalb des Fahrzeugmodells eine gleiche Gitterauflösung sein sollte, dass die Gitterverfeinerung um die Räder eine verstärkte Oszillation der Luftwiderstände mit sich trägt, und dass eine höhere Verfeinerungsstufe im Totwasser und im Nachlauf bei PANS zwar zu einer besseren Auflösung der Strömung führen würde, aber auf die Luftwiderstände keine große Auswirkung hatte und weitere 10 Millionen Zellen kostete. Ebenso hat sich herausgestellt, dass für eine korrekte Abbildung der Ablösungen an den Kanten eine bestimmte Dicke der verfeinerten Zellen notwendig ist. Schließlich wurde ein Optimum der Einstellungen gefunden, bei dem die Luftwiderstände vom Gitter unabhängig sind. So ein Gitter stellt die Variante *mio_11a* dar.

Die Einstellungen für das *FAME Hexa* Werkzeug wurden aus der Gittervariante *mio_11a* der Gitterstudie auf Vernetzung eines detaillierten Modells des BMW 5er-Reihe E60 im Maßstab 1:2,5 übertragen. Dabei hat die detailgetreue Abbildung aller Anbauteile zum erheblichen Anstieg der Zellenanzahl geführt. Um eine fehlerhafte Berechnung der wirkenden Kräfte auf eine aufgeschnittene Oberfläche, welche durch die auf der Fahrbahn angebrachten Räder dargestellt ist, die bei *AVL Fire* vorkommt, umzugehen, wurden die Räder bei einem minimalen Abstand zum Schweben gebracht. Diese Maßnahme wurde anhand der RANS Simulationen sorgfältig untersucht. Nach dem Vergleich der Luftwiderstände, der Druckverteilung auf der Fahrzeugoberfläche, der Geschwindigkeitsplots und nach Betrachtung der entstehenden Iso-Flächen des Q-Kriteriums und der Wirbelstärke, wurde diese Modifikation angenommen.

Zweitrangig wurde das in dieser Arbeit verwendete TVD (*total variation diminishing*) *AVL SMART Relaxed* Schema, das in dem konvektiven Fluss der Kontinuitätsgleichung eingesetzt wird, verifiziert.

Weiter hat man sich mit der Fahrzeugumströmung in einer rechteckigen Domäne, die bei Fahrzeugsimulationen üblicherweise verwendet wird, und in einem Wildkanalnachbau mit Düse, Kollektor und Plenum befasst. In dem Windkanal, in dem das entsprechende Experiment durchgeführt wurde, hat der Düsen Eintritt einen kleineren Querschnitt als der Kollektorausstritt. Dadurch verlangsamt sich die Strömungsgeschwindigkeit im Plenum. Dort kommt es zusätzlich zu einer Ausweitung des Freistrahls. Diese Strömungseigenschaften wurden bei der Simulation des Windkanalnachbaus reproduziert. Die verkleinerte Anströmungsgeschwindigkeit verursacht auf dem Fahrzeug einen kleineren Luftwiderstand c_d und einen kleineren Auftrieb c_l als bei einer Strömung mit konstanter Geschwindigkeit in der rechteckigen Domäne. Dazu wurden die Momentenbeiwerte, die Druckverteilung an der Fahrzeugoberfläche und die Geschwindigkeitsplots mit folgender Schlussfolgerung analysiert: Bei der Strömungssimulation eines Experiments, das im Windkanal stattgefunden hat, ist es nötig die geometrischen Gegebenheiten der einzelnen Bauelemente nachzubilden, um die Strömungszustände, denen der Prüfling ausgesetzt ist, korrekt zu erfassen.

Bei den Untersuchungen wurden drei Simulationsverfahren verwendet: stationäres RANS, instationäres URANS, die das Strömungsfeld komplett modellieren, und instationäres hybrides PANS, das einen Teil der Strömung direkt auflöst. Alle drei Simulationsverfahren - bei PANS der nichtaufgelöste Teil - basieren auf dem $k - \varepsilon - \zeta - f$ Turbulenzmodell und benutzen eine hybride Wandfunktion (*compound wall treatment*) für die Modellierung der Wandnähe. Die Untersuchung zeigt bei allen Vergleichskriterien bei der PANS Simulation die beste Übereinstimmung mit dem Experiment. Vor allem der Luftwiderstand c_d und der Auftrieb c_l , der bei den RANS und URANS Simulationen meistens deutlich überschätzt wird, wurden gut getroffen. Der Druck in Form des Druckbeiwertes c_p ist ein robustes Kriterium, das meistens in der Größenordnung bei allen Simulationen dem Experiment entspricht.

Anschließend wurde in den Simulationen die Grenzschichtabsaugung *BLC* (*boundary layer control*) aus dem Windkanal eingeführt. Bei den Simulationen mit der Geometrie des Windkanalnachbaus erfolgt die Grenzschichtabsaugung *BLC* mittels einer zusätzlichen Auslassebene, die ein Teil der Strömung absaugt, so wie es in der Realität der Fall ist. Durch diese Maßnahme wird die Strömung in dem unteren Bereich des Fahrzeuges beschleunigt, was zur Erhöhung des Luftwiderstands c_d und zur Verminderung des Auftriebs c_l

führt. Die Absenkung des Auftriebs c_l konnte bei allen RANS, URANS und PANS Simulationen nach dem Experiment reproduziert werden. Der Anstieg des Luftwiderstands c_d , welchen das Experiment zeigt, konnten die Simulationen nicht abbilden. Die Simulationen mit der Grenzschichtabsaugung *BLC* wurden denen ohne *BLC* gegenübergestellt. Beim Vergleich der Luftwiderstands- und Momentenbeiwerte wurde die beste Übereinstimmung mit den experimentellen Daten bei den PANS Simulationen erreicht. Aus diesem Grund wurden nur die PANS Simulationen für die Beschreibung der Unterschiede bei der Druckverteilung und der Umströmung ausgewählt.

Anschließend wurden die RANS, URANS und PANS Simulationen mit der Grenzschichtabsaugung *BLC* für die Beschreibung der Wirbelstrukturen, die auf der Fahrzeugoberfläche, in dem Totwasser und in dem Nachlauf entstehen, ausgewählt. Die Analyse beruft sich auf zahlreiche Geschwindigkeitsplots, die so positioniert wurden, damit die Spuren der dreidimensionalen Strukturen sichtbar aufgefangen werden konnten. Auch die Abbildungen der Iso-Flächen des gemittelten und augenblicklichen Q -Kriteriums und der Wirbelstärke haben sich für die Darstellung der Wirbelstrukturen zu Nutze gemacht. Die wirbelauflösende PANS Methode liefert nicht nur die meisten Wirbelstrukturen, sondern bildet sie auch mit der größten Übereinstimmung mit der Theorie ab. Bei den RANS und URANS Methoden wird die Strömung zu 100% modelliert; deswegen konnten sie nur die Grobstrukturen abbilden. Die zeitliche Diskretisierung bei URANS bringt zeitabhängige Strukturen in die Strömung. RANS beschränkt sich auf eine Darstellung konvergierter Strömung, wodurch nur die stärksten Wirbelstrukturen erfasst werden.

Die Betrachtung der Simulation wäre nicht vollständig, würde man die turbulenten Größen und die Qualitätsmerkmale des Gitters nicht erwähnen. Die Größe der turbulenten kinetischen Energie und der Dissipationsrate unterstreicht die vorherige Beobachtung bei RANS, URANS und PANS bezüglich der Wiedergabe der Wirbelstrukturen. Die größere turbulente kinetische Energie bei PANS deutet auf stärkere energietragende Wirbelstrukturen hin. Die erhöhte Dissipation bei RANS und URANS bedeutet einen intensiven Zerfall der Wirbel in der unmittelbaren Fahrzeugnähe.

Die Gitterqualität wird anhand von Kriterien wie: dem dimensionslosen Wandabstand y^+ , der CFL-Zahl, dem Δ/η -Verhältnis und bei PANS zusätzlich noch dem f_k -Parameter bestimmt. Weil das Strömungsbild bei allen drei Simulationsverfahren ähnlich ist, beruft sich die Auswertung nur auf die PANS Simulation. Nach dem dimensionslosen Wandabstand y^+ liegt der erste Zellmittelpunkt meistens in der Übergangsschicht, wo das Geschwindigkeitsprofil durch die angewandte hybride Wandfunktion gut erfasst werden kann. Über das Verhältnis zwischen der Gitterweite und dem Zeitschritt berichtet die CFL-Zahl. In den fein vernetzten Bereichen liegt die CFL-Zahl zwar über eins, was aber bei der hier verwendeten impliziten Zeitdiskretisierung zugelassen ist. Die $CFL < 1$ in der restlichen Rechendomäne trägt dann zu der Berechnungsstabilität bei. Nach der Δ/η Kennzahl ist das verwendete Gitter nicht in der Lage, sehr kleine Wirbelstrukturen abzubilden. Meistens werden mehr als 100-fach größere Wirbel als die kleinsten Kolmogorov-Strukturen durch das Gitter aufgefangen.

Bei der Betrachtung des für PANS relevanten f_k -Parameters wird der f_k -Parameter, der aus der Formulierung im Turbulenzmodell kommt, dem Verhältnis der nichtaufgelösten zur gesamten turbulenten kinetischen Energie gegenübergestellt. Aus diesem Vergleich ist ersichtlich, dass die in dem Turbulenzmodell vorhersagte Verteilung des f_k -Parameters an den meisten Stellen größere Werte als das Verhältnis k_u durch k_{tot} zeigt. Das bedeutet, dass das Gitter in der Lage ist, mehr turbulente kinetische Energie direkt aufzulösen als vorhersagt wurde und so der nichtaufgelöste, sprich modellierte Anteil, kleiner ist. Der Großteil der Strömung wird an den relevanten Stellen d. h. im Totwasser und im Nachlauf direkt aufgelöst.

Die Glaubwürdigkeit des Gittes des Windkanalnachbaus musste ebenso geprüft werden. Jeder Windkanal „Göttinger“ Bauart mit Freistrahlmessstrecke weist einen spezifischen Druckverlauf auf. Aus diesem Anlass wurde der Windkanalnachbau ohne das Fahrzeugmodell vernetzt und durch RANS, URANS und PANS in den Varianten mit und ohne Grenzschichtabsaugung *BLC* simuliert. Dabei wurde die Verteilung des statischen Druckes an bestimmten Messpunkten im Plenum mit den experimentellen Werten verglichen. Der Verlauf des Druckbeiwertes c_p konnte bei allen Simulationen gut abgebildet werden. Dabei hat sich aber die Randbedingung *Static Pressure* auf der Auslassebene als störend herausgestellt und wurde für weitere Simulationen durch *Gradient = 0 – all variables* ersetzt. Die Geschwindigkeitsprofile mit und ohne Grenzschichtabsaugung *BLC* haben bei den Simulationen eine Abweichung zum Experiment, die in den groben Zellen in der Grenzschicht ihre Ursache hat, gezeigt. Anhand der PANS Simulationen wurden die Unterschiede zwischen der Strömung

mit und ohne Grenzschichtabsaugung *BLC* mittels Geschwindigkeitsplots dargestellt und diskutiert. Zum Schluss der Verifizierung wurde anhand des *Q*-Kriteriums die Fähigkeit des PANS Verfahrens, die Wirbelstrukturen, die vor allem beim Vermischen des Freistrahls mit der ruhenden Umgebung entstehen, nachzubilden demonstriert.

Nachdem das Gitter für das Fahrzeugmodell und den Windkanalnachbau abgestimmt und Simulationen ohne und mit Grenzschichtabsaugung *BLC* erfolgreich durchgeführt wurden, konnte das Hauptziel - der Überholvorgang - simuliert werden. Zuerst wurde er in acht statischen Positionen und anschließend als ein dynamischer Vorgang nachgestellt. Als PKW-Modell verbleibt der BMW 5er-Reihe E60 im Modellmaßstab 1:2,5. Bei dem LKW-Modell handelt es sich um eine deutlich vereinfachte und kantige Geometrie eines Lastwagens ebenso im Maßstab 1:2,5, der aber auf eine Länge von $l = 2,5m$ gekürzt wurde.

Bei der statischen Darstellung des Überholvorgangs wurde das PKW-Modell an einem Punkt fixiert (im Windkanal entspricht es der Mitte des Messtisches) und nur das LKW-Modell wurde bewegt. Aus diesem Grund wurde das Gitter geteilt. So wurde der immer gleiche PKW-Teil mit den acht unterschiedlichen LKW-Teilen durch ein Interface zusammengeklebt. Die beiden Fahrzeugmodelle wurden in *FAME Hexa* separat vernetzt. Die Gittereinstellungen für das *FAME Hexa* des PKW-Modells wurden zum größten Teil aus dem Solofahrzeug übernommen. Dazu wurde das Gitter zwischen beiden Fahrzeugen mehr verfeinert. Bei der Übernahme der Einstellungen aus dem *FAME Hexa* des PKWs für das LKW-Modell ist eine *FAME Hexa* Domäne mit zirka 16 Millionen Zellen entstanden. Um den Rechenaufwand klein zu halten, wurde bei dem *FAME Hexa* Gitter des LKWs die Verfeinerung um eine Stufe zurückgesetzt und ein grobes Gitter generiert. Durch das grobe Gitter konnten etwa 40% Zellen gespart werden. Um einen Gittereinfluss auszuschließen, wurde an dieser Stelle eine kleine Gitterstudie durchgeführt. Die Gitterstudie verwendet die rechteckige Rechendomäne und findet in der Position $x/L = 0,39$ statt. Anhand der RANS Simulationen wurden die Luftwiderstands- und Momentenbeiwerte von beiden Fahrzeugen untersucht. Um eine Auswirkung auf das PKW-Modell auszuschließen, wurde die Druckverteilung an der PKW-Oberfläche bei beiden Simulationen miteinander verglichen. Die Strömungsänderung sollte anhand der Betrachtung eines Geschwindigkeitsplots ausgeschlossen werden. Die Gitterqualität auf der LKW-Oberfläche wurde durch den dimensionslosen Wandabstand y^+ betrachtet. Sowohl bei den Luftwiderständen als auch bei den Momenten der beiden Fahrzeuge wurde eine gute Übereinstimmung erreicht. Der Druck an der rechten PKW-Seite und das Strömungsbild um die beiden Fahrzeuge sind unverändert geblieben. Bei dem groben Gitter hat sich zwar das y^+ erhöht, sein Maximalwert liegt aber immer im logarithmischen Bereich. Als Ergebnis der Gitterstudie wurde das grobe Gitter des LKWs für weitere Berechnungen zugelassen.

In der Position $x/L = 0,39$, also in der Position mit dem höchsten PKW-Luftwiderstand c_d , wurde weiterhin der Einfluss der rechteckigen Domäne und des Windkanalnachbaus untersucht. Als nächstes wurde in dem Nachbau des BMW-Windkanals die Wirkung der Grenzschichtabsaugung *BLC* nachgestellt und betrachtet. Bei allen RANS, URANS und PANS Simulationen der rechteckigen Domäne und des Windkanalnachbaus mit und ohne Grenzschichtabsaugung *BLC* wurden die Luftwiderstände und Momente der beiden Fahrzeuge miteinander verglichen. Die Wechselwirkung ist in dieser Position bei allen Simulationen zu stark abgebildet. Dabei wurde beim PKW der Luftwiderstand c_d , die Seitenkraft c_s und der Auftrieb c_l im Vergleich mit dem Experiment überschätzt. Durch die Strömung konstanter Geschwindigkeit wurde der Luftwiderstand c_d bei beiden Fahrzeugen am stärksten und so hatte beim PKW die größte Abweichung. Durch den Freistrah im Windkanalnachbau konnte der überschätzte Luftwiderstand c_d deutlich und der Auftrieb c_l leicht reduziert werden. Aus diesem Grund wurde für die anderen Überholpositionen nur der Windkanalnachbau verwendet. Anschließend konnte der Auftrieb c_l in Übereinstimmung mit dem Experiment weiter abgeschwächt werden. Der experimentell beobachtete Anstieg des Luftwiderstands c_d im Fall der Grenzschichtabsaugung *BLC* konnte bei den Simulationen nicht wiedergegeben werden. Beim Vergleich der Simulationsverfahren hat der Luftwiderstand c_d und die Seitenkraft c_s des PKWs bei RANS, URANS und PANS einen ähnlichen Wert angenommen. Der Auftrieb c_l , vor allem im Fall der Grenzschichtabsaugung *BLC*, hat bei PANS die beste Übereinstimmung mit dem Experiment gezeigt. Hier hat das PANS Simulationsverfahren einen entscheidenden Vorteil gegenüber den anderen verwendeten Methoden nachgewiesen und wurde nicht nur deswegen bei unterschiedlichen Vergleichen und Auswertungen bevorzugt. Dasselbe gilt auch für den Vergleich der Druckverteilung auf der PKW-Oberfläche. Die Druckunterschiede zwischen der rechteckigen Domäne und dem Windkanalnachbau mit und ohne Grenzschichtabsaugung *BLC* wurden anhand der PANS Simulationen gezeigt. Der kleinere Druck auf der PKW-Oberfläche bei der rechteckigen Domäne unterstützt den

beobachteten erhöhten Luftwiderstand c_d und deutet auf eine schnellere Anströmung hin. Die durch die Grenzschichtabsaugung *BLC* beschleunigte Umströmung und der somit niedrigere Druck an der Ober- und Unterseite des PKWs, der beim Experiment beobachtet wurde, konnte bei den Simulationen nicht wiedergegeben werden. Der niedrigere Auftrieb c_l bei der PANS Simulation resultiert aus der kleineren Druckerhöhung unten als oben. Trotzdem wird die Geschwindigkeitsdifferenz - eine schnellere Strömung unterhalb des Fahrzeuges als oberhalb - bei PANS richtig abgebildet. Diese Behauptungen wurden noch anhand von Druck- und Geschwindigkeitsplots weiter untersucht und bestätigt. Zusätzlich haben die Druckplots bei der Grenzschichtabsaugung *BLC* auf der Darstellungsebene eine schwächere Wechselwirkung zwischen beiden Fahrzeugmodellen gezeigt, was die Absenkung des Luftwiderstands c_d gut unterstützt. Anhand der Geschwindigkeitsplots wurden die Unterschiede zwischen dem Freistrahle und der Strömung konstanter Geschwindigkeit deutlich dargestellt.

Bei den anderen Positionen wurde das Experiment nur bei eingeschalteter Grenzschichtabsaugung *BLC* durchgeführt. Deswegen wurden bei den Positionen $x/L = -1,60; -1,20; -0,80; -0,40; 0,00; 0,39; 0,77; 1,17$ nur RANS, URANS und PANS mit Grenzschichtabsaugung *BLC* untereinander verglichen. Aus Betrachtung der Luftwiderstände und Momente kann das Verhalten des PKWs während des Überholvorgangs wie folgt beschrieben werden: Wenn sich der PKW hinter dem LKW befindet, befindet sich der PKW im Windschatten, wodurch der Luftwiderstand c_d kontinuierlich abgesenkt wird. Dabei wird der PKW von dem LKW-Totwasser, in dem ein niedrigerer Druck herrscht, angesaugt, was mit einer starken Seitenkraft c_s verbunden ist. Die Strömung in der Bodennähe wird durch den LKW verlangsamt, der Auftrieb c_l des PKWs nimmt an. Weil der Unterdruck überwiegend die rechte Seite beeinflusst, rollt der PKW im Uhrzeigersinn. Durch den steigenden Verlauf des Auftriebs c_l wird immer die Vorderachse weniger entlastet als die Hinterachse, der PKW nickt nach vorne. Solange die vordere Fahrzeughälfte dem LKW-Totwasser näher ist, giert der PKW leicht im Uhrzeigersinn. Ab der Position $-0,40$ an der sich der PKW neben dem LKW befindet, setzt sich die Wirkung des Hochdrucks aus dem LKW-Staugebiet durch, sodass der Luftwiderstand c_d nun steigt. Durch das Hochdruckgebiet stoßt der LKW den PKW von sich ab, was mit einer negativen Seitenkraft c_s verbunden ist. Die Strömung in Bodennähe wird durch den LKW immer weniger beeinflusst und der PKW-Unterboden trifft immer mehr auf saubere Strömung, wodurch der Auftrieb c_l eine sinkende Tendenz hat. Durch das Hochdruckgebiet ändert sich die Wirkung des Rollmoments c_{M_x} und der PKW rollt zunehmend gegen den Uhrzeigersinn. Die vordere PKW-Hälfte wird durch das Hochdruckgebiet mehr entlastet als die hintere; somit nickt der PKW nach hinten. Dabei wird auch die vordere Hälfte mehr abgestoßen, was mit einem negativen Giermoment c_{M_z} verbunden ist; der PKW giert gegen den Uhrzeigersinn. Bei der Position $0,39$ findet die stärkste Zusammenwirkung der beiden Fahrzeuge statt. Das Hochdruckgebiet erzeugt am PKW den höchsten Luftwiderstand c_d , das heißt die Druckdifferenz zwischen vorne und hinten ist am größten. Bei den weiteren Positionen kommt der PKW vor den LKW; der Luftwiderstand c_d sinkt, das Hochdruckgebiet wirkt auf den PKW mehr von hinten und so wird der PKW nach vorne geschoben. Die Position $0,39$ und die nächste, bei der das Hochdruckgebiet die ganze linke PKW-Seite trifft, ist durch das stärkste Abstoßen bzw. die stärkste negative Seitenkraft c_s gekennzeichnet. Durch den LKW wird die Strömung in Bodennähe immer weniger beeinflusst, der Auftrieb c_l sinkt bis auf einen Auftrieb c_l des Solofahrzeugs. Ähnlich wie die Seitenkraft c_s verhält sich das Rollmoment c_{M_x} ; bei den Positionen $0,39$ und $0,77$ rollt der PKW gegen den Uhrzeigersinn. Danach klingt er wieder ab. Nur die Position $0,39$ ist durch ein positives Nickmoment c_{M_y} geprägt. Hier wird die Vorderachse mehr entlastet als die Hinterachse. Bei anderen Positionen wird der Auftrieb c_l immer hinten höher. Weil das Hochdruckgebiet bei der Position $0,39$ nur die vordere Hälfte trifft, entsteht dadurch das größte negative Giermoment c_{M_z} ; der PKW giert gegen den Uhrzeigersinn. Umgekehrt beeinflusst auch der Staupunkt und das Totwasser des PKWs den LKW. Weil der PKW kleiner als der LKW ist, sind auch die Anregungen wesentlich kleiner. Der LKW reagiert auf den erhöhten Druck aus dem PKW-Staugebiet durch steigende Seitenkraft c_s , wodurch er von dem PKW abgestoßen wird, durch ein erhöhtes positives Rollmoment c_{M_x} , das mit dem LKW im Uhrzeigersinn rollt, durch ein negatives Giermoment c_{M_z} , bei dem der LKW, wenn das Hochdruckgebiet auf die hintere LKW-Hälfte wirkt, zuerst gegen den Uhrzeigersinn giert, und dann durch ein positives Giermoment c_{M_z} in dem Uhrzeigersinn giert, wenn das Hochdruckgebiet die vordere LKW-Hälfte trifft. Das PKW-Totwasser erzeugt auf dem LKW eine Absenkung des Luftwiderstands c_d , eine Verkleinerung der Seitenkraft c_s jedoch keine Ansaugung. Das PKW-Totwasser ist so schwach, dass es ebenfalls nicht schafft, den LKW zu sich zu rollen und zu sich zu gieren. Wenn der PKW sich vor dem LKW befindet, trifft der verwirbelte und langsame Nachlauf des PKWs den LKW und es kommt zu einer Erhöhung des LKW-

Auftriebs c_l . Bei den Positionen $x/L = -1,60$ und $1,17$, bei denen der LKW nahe dem Düsenaustritt bzw. dem Kollektoreintritt steht, kommt es wegen dem Blockierungseffekt zu einer Interferenz mit dem Windkanal, was die Luftwiderstände und Momente bei beiden Fahrzeugen negativ beeinflusst. Diese Interferenzen konnten bei der Simulation des Windkanalnachbaus abgebildet werden und wären in einer rechteckigen Domäne nicht reproduzierbar. Bei einer Strömungssimulation muss man sich an dieser Stelle entscheiden, ob man das Experiment nachstellen, oder eine unbeeinflusste idealisierte Fahrzeugumströmung abbilden will. Anschließend wurden die Luftwiderstände und Momente des PKWs bei allen drei RANS, URANS und PANS Simulationsverfahren miteinander verglichen und dem Experiment gegenübergestellt. Die beste Übereinstimmung bei den meisten Positionen oder eine richtige Tendenz mit dem Experiment bringen die PANS Simulationen. Vor allem die Tendenz der Seitenkraft c_s und der niedrige Auftrieb c_l sollten bei PANS betont werden.

Die Auswirkungen des niedrigeren Druckes aus dem Totwasser und des erhöhten Druckes aus dem Staugebiet des LKWs auf die PKW-Oberfläche wurden auch durch Verläufe des Druckwiderstandsbeiwerts c_D auf jeder Fahrzeugseite beschrieben und die Ergebnisse der RANS, URANS und PANS Simulationen dabei miteinander verglichen. Dabei wurden nur die Abweichungen des Druckes während des Überholvorgangs von dem Druck des Solofahrzeugs aufgetragen. So lässt sich die Druckveränderung, die durch die Überholung verursacht wurde, von der Druckverteilung auf dem Fahrzeug gut trennen. Die PANS Simulationen bringen an den meisten Messpunkten wieder eine bessere Übereinstimmung mit den experimentellen Werten. Die folgende Strömungsbetrachtung findet deswegen nur anhand der PANS Simulationen statt. Die Wechselwirkung der Hochdruck- und der Tiefdruckgebiete der beiden Fahrzeuge wurde dann auf einer horizontalen Ebene beschrieben und die Druckverteilung auf der ganzen PKW-Oberfläche bei allen Überholpositionen gezeigt. Auf der gleichen Ebene wurde auch die Zusammenwirkung der Totwasser- und der Ablösungsgebiete anhand der Geschwindigkeitsplots und die Änderung des Freistrahls durch die unterschiedliche Positionierung der Fahrzeugmodelle dargestellt. Bei der weiteren Betrachtung wurden anhand der vertikalen Längsmittelschnitte der beiden Fahrzeugmodelle die in den Totwässern entstehenden Wirbelstrukturen bei allen drei RANS, URANS und PANS Simulationsverfahren näher untersucht. Bei PANS wird die Rezirkulationszone kürzer und die dort entstehenden Wirbelstrukturen entsprechen mehr der Theorie. Zusätzlich wurde anhand einer Kombination von horizontalen und vertikalen Schnitten die Neigung des Totwassers während des Überholvorgangs untersucht. Zum Schluss der Strömungsbetrachtung wurde bei RANS, URANS und PANS mittels der Iso-Flächen des gemittelten und augenblicklichen Q -Kriteriums und der Wirbelstärke abgebildet, wie die Nachläufe sich gegenseitig beeinflussen, wie sie zusammen wachsen, oder wie einer von dem anderen gespeist wird und auch wie er durch das Hochdruckgebiet verkleinert wird. Dabei kann PANS mehrere Feinstrukturen in diesem Spektrum des Q -Kriteriums bzw. der Wirbelstärke abbilden. Ebenso ist ersichtlich, wie bei PANS auf dem PKW realistische Längs-, Quer- und Ringwirbel entstehen.

Nach dieser Strömungsauswertung wurden wieder wie in dem vorherigen Kapitel die relevanten turbulenten Größen und die Gitterqualität betrachtet. Die Auswertung findet bei RANS, URANS und PANS aber nur anhand der ausgewählten Position $0,39$ statt. Bei PANS entsteht in der Umströmung und in den Nachläufen der beiden Fahrzeuge ebenso wie bei dem Solofahrzeug eine starke turbulente kinetische Energie, die in den energietragenden Wirbelstrukturen enthalten ist. Dazu zeigt die erhöhte Dissipationsrate bei RANS und URANS, dass die turbulente kinetische Energie sich schneller abbaut, sodass es zu einem intensiven Wirbelzerfall kommt.

Bei den stationären und instationären Simulationen bei der Position $0,39$ wurde die Gitterqualität anhand des dimensionslosen Wandabstands y^+ betrachtet. Bei den instationären wurde sie zusätzlich anhand der CFL-Zahl, des δ/η -Verhältnisses und bei PANS nach dem f_k -Parameter analysiert. Nach $y^+ \approx 20$ bei dem PKW und $y^+ \approx 30$ beim LKW liegt der erste Zellmittelpunkt auf beiden Fahrzeugoberflächen in der Übergangsschicht. Die hier verwendete hybride Wandfunktion blendet in diesem Bereich zwischen der viskosen Unterschicht und dem logarithmischen Bereich. Durch die CFL-Zahl wird der Zeitschritt gegenüber dem Gitter gestellt. In dem grob vernetzten Teil des Gitters liegt die $CFL < 1$. In der fein vernetzten *FAMEHexa* Domäne erreicht die CFL-Zahl Werte zwischen $CFL = 1,5 \div 3$. Die dort und in der Nähe des PKWs und LKWs erhöhte CFL-Zahl beeinflusst bei der impliziten Zeitdiskretisierung, die hier verwendet wurde, nicht die Rechenstabilität. Bei der δ/η Kennzahl erreichen die Maximalwerte in den relevanten Strömungsbereichen beim PKW $\frac{\delta}{\eta} = 250$ und $\frac{\delta}{\eta} \approx 400$ bei dem LKW. Durch die dort erhöhte Dissipation konnten die Gitterzellen nur um 250-fach bzw. 400-fach größere Wirbelstrukturen als die kleinsten Kolmogorov-Strukturen auffangen,

was den empfohlenen Wert von $\frac{\delta}{\eta} < 30$ bei LES wesentlich überschreitet. Für die Formulierung des f_k -Parameters in dem hybriden PANS Verfahren sind die Gitterzellen an Stellen mit erhöhter Dissipation meistens nicht fein genug und die Strömung wurde dort komplett modelliert. Im Totwasser und im Nachlauf der beiden Fahrzeuge, bzw. an Stellen mit kleiner Dissipation und feinen Zellen, wurde im Gegensatz von dem Turbulenzmodell bestimmt, die Strömung zum größten Teil direkt aufzulösen. Anhand der Darstellung k_u durch k_{tot} wurde nachgewiesen, dass die durch das Turbulenzmodell getroffene Abschätzung von der Gitterauflösung unterstützt wird. Das heißt, dass durch das Gitter mehr turbulente kinetische Energie aufgelöst werden konnte, als im Modell vorhersagt wurde. Die Abbildung der nichtaufgelösten zur gesamten turbulenten kinetischen Energie hat somit kleinere Werte gezeigt als der f_k -Parameter.

Zum Schluss dieser Arbeit wurde das Überholungsmanöver als ein dynamischer Vorgang nachgestellt. Im Gegensatz zur vorherigen Untersuchung berufen sich die Simulationen auf eine Straßenmessung mit realen Fahrzeugen. Der BMW 5er-Reihe E60 als PKW und der MAN L2000 als LKW sind bei den Simulationen durch die vereinfachten Fahrzeugmodelle aus vorherigem Kapitel vertreten geblieben. Dabei wurde auch der Maßstab 1:2,5 beibehalten und durch eine erhöhte Fahrgeschwindigkeit nach Reynoldsscher Ähnlichkeit kompensiert. Es gibt aber auch eine Geschwindigkeitsdifferenz zwischen dem PKW und dem LKW, die bei den Simulationen nachgestellt werden musste. An dieser Stelle wurden zwei Varianten vorgestellt, die sich eine Gitterbewegung zu Nutze machen. Bei der ersten Variante repräsentiert die Anströmgeschwindigkeit die Fahrgeschwindigkeit des LKWs und die Geschwindigkeit, mit der sich das Gitter bewegt, kompensiert den Geschwindigkeitsunterschied des PKWs. Dabei ist die Position des LKWs fixiert und der PKW fährt an ihm vorbei. Bei der zweiten Variante wird die Fahrzeugbewegung nur durch die Gitterbewegung dargestellt; es gibt in diesem Fall keine Anströmung. Die ganze Domäne bewegt sich mit der Geschwindigkeit des LKWs, die PKW-Seite bewegt sich dazu einmal so schnell und überholt den LKW. Bei der Gittergenerierung wurden die beiden *FAME Hexa* Domänen übernommen und wieder um sie herum eine geteilte, durch ein Interface verbundene, diesmal aber rechteckige Rechendomäne aufgebaut, die einer Straßenmessung besser entspricht. Bei der PKW-Bewegung bewegt sich der ganze Block, der um die *FAME Hexa CAR* Domäne aufgebaut wurde, während sich die Zellschichten davor quetschen und dahinter dehnen. Die Überholung erfolgt nun zwischen den Positionen $x/L = -5$ und $x/L = 5$, wobei wieder nur die acht Positionen $x/L = -1,60; -1,20; -0,80; -0,40; 0,00; 0,39; 0,77$ und $1,17$ untersucht wurden. Bei der ersten Variante, die als *slip* bezeichnet wurde, musste das Geschwindigkeitsprofil der Anströmung einer ruhenden Luft aus der Straßenmessung entsprechen. Dafür wurde auf der Fahrbahn der Wert der freien Anströmung fixiert und somit die Grenzschicht, vor allem unter den Fahrzeugen, bzw. an Stellen der Strömungs-Beschleunigung oder Verzögerung, passend manipuliert. Der Überholvorgang an sich dauert relativ kurz. Für die Entwicklung der Strömung hinter beiden Fahrzeugen wurden Vorbereitungssimulationen berechnet. Dabei wurde das Gitter nicht bewegt, bzw. bei der zweiten *move* Variante die ganze Domäne nur mit der Geschwindigkeit des LKWs bewegt. Die Vorbereitungssimulationen der *slip* Variante beinhalten RANS, URANS und PANS Berechnungen. Wegen der Darstellung der Bewegung wurden bei der *move* Variante nur die instationären URANS und PANS Verfahren eingesetzt. Dabei ist die Anström- bzw. Fahrgeschwindigkeit für beide Fahrzeuge gleich. Bei allen Vorbereitungssimulationen wurden nur die Luftwiderstände und Momente als ein Stabilitätsmerkmal beobachtet. Mit Ergebnissen aus den Vorbereitungssimulationen wurden dann die Simulationen des Überholungsmanövers, bei denen sich die *CAR* Domäne bewegt, initialisiert. Beim Anlaufen musste der PKW nur um den Geschwindigkeitsunterschied beschleunigen und so konnte sich die Umströmung des PKWs in relativ kurzer Zeit auf die simulierte Fahrgeschwindigkeit anpassen. Die Luftwiderstände und Momente wurden bei den Simulationen des Überholvorgangs in einem dynamischen Verlauf aufgefangen und konnten nicht gemittelt werden. Ein Teil des Kapitels wurde einer Zeitschrittstudie gewidmet, bei der abgestimmt wurde, wie die zeitliche Diskretisierung die Luftwiderstände und Momente beeinflusst und anschließend wurde als Ergebnis ein optimaler Zeitschritt ausgewählt. Beim Vergleich der Simulationsverfahren wurden die Verläufe der Seitenkraft c_s und des Giermoments c_{M_z} mit den experimentellen Daten abgeglichen. Dabei konnte das PANS Verfahren wieder die beste Übereinstimmung erzielen. Der Vergleich der *slip* und *move* Variante hat bei *slip* eine bessere Übereinstimmung bei den Verläufen der Luftwiderstände und Momente im Bezug auf die Theorie und auf die Straßen- und Windkanalmessung gezeigt. Obwohl die *move* Variante die exakten Gegebenheiten aus der Straßenmessung widerspiegelt, scheint die CFD Software besser auf eine Anströmung abgestimmt zu sein, als auf eine Umströmung ohne Einlass, die nur durch eine Bewegung erzeugt wird. Nach der Windschattenfahrttheorie sinkt der Luftwiderstand c_d des Folgefahrzeugs umso mehr, desto näher es sich dem Führungsfahrzeug befindet; was nur durch die *slip* Simulationen deutlich abgebildet wurde. Der verspätete Anstieg der Seitenkraft c_s des PKWs wurde durch die unterschiedliche LKW-Länge bei den Simulationen und

bei dem Experiment verursacht. Die Widrigkeit des PKW-Auftriebs c_l bei diesem dynamischen Vorgang ist mit größeren Abweichungen verbunden als bei der Untersuchung der statischen Positionen. Das Überholungsmanöver, dynamisch betrachtet, ist allgemein durch schwächere Wirkung der Kräfte und Momente geprägt, als wenn es statisch nachgestellt wird. In dem dynamischen Vorgang ist die Zusammenwirkung bzw. die Entwicklung der Kräfte und Momente zeitlich begrenzt; sie kann sich nicht vollständig ausprägen wie bei statischen Positionen und klingt schneller ab. Der Verlauf der Luftwiderstands- und Momentenbeiwerte wird somit gedämpft und durch stochastische Oszillationen, die die Ablösungen an der Fahrzeugoberfläche darstellen, gestört. Die doppelt so große Fahrgeschwindigkeit des vorbeifahrenden PKWs bei der dynamischen Überholung hat im Vergleich zu den statischen Positionen eine Verstärkung der Zusammenwirkung zur Folge; die Verläufe der LKW-Luftwiderstands- und Momentenbeiwerte zeichnen sich durch größere Oszillationen aus. Generell filtert ein grober Zeitschritt nur die stärkste Zusammenwirkung aus, womit die schwächeren aber wichtigen Wirkungen vernachlässigt werden. Der feinste Zeitschritt wird weiter als der genaueste betrachtet, obwohl der Verlauf durch die Abbildung kleinerer Strukturen unharmonischer wirkt. Anhand des kleinsten hier verwendeten Zeitschrittes wurde die Druckverteilung und die weitere Auswertung abgewickelt. Die PANS Simulationen der beiden *slip* und *move* Varianten mit dem kleinsten Zeitschritt wurden zusammen mit den PANS Simulationen mit Grenzschichtabsaugung *BLC* aus der statischen Untersuchung untereinander verglichen. Der Verlauf des Druckwiderstandsbeiwerts c_p auf der PKW-Oberfläche wurde wieder auf die entsprechende PANS Simulation des Solofahrzeugs bezogen. Die Druckverteilung ergänzt die Beobachtung bei den Luftwiderstands- und Momentenbeiwerten. Der Druckunterschied gegenüber dem Solofahrzeug ist bei dem dynamischen Vorgang schwächer ausgeprägt als bei der statischen Untersuchung. Dabei haben nur die Messdaten aus dem Windkanal als Referenz gedient. Die schwächere Zusammenwirkung ist aus den oben genannten Gründen ziemlich plausibel. Die Tendenz der Wirkung sollte aber bei allen Fällen beibehalten werden. Dies ist nur der *slip* Variante gelungen; der Druckverlauf bei der Variante *move* war mit zahlreichen Abweichungen behaftet. Weiter wurde bei den drei PANS Simulationen der Druckbeiwert c_p auf beiden Fahrzeugoberflächen dargestellt. Der schneller fahrende PKW erzeugt auf der LKW-Oberfläche tiefere Drücke. Bei einheitlicher Darstellung des Druckbeiwerts c_p auf einer horizontalen Ebene erzeugt der PKW dank seiner höheren Geschwindigkeit größere Tiefdruckgebiete, denen der LKW ausgesetzt ist. Dies bedeutet aber keine Wechselwirkung, weil analog dazu der langsamere LKW in den *slip* und *move* Varianten eine schwächere Wirkung auf den PKW hat. Weil der Druck immer Hand in Hand mit der Geschwindigkeit geht, wurde die Wechselwirkung und die Umströmung der beiden Fahrzeuge ebenso anhand der Geschwindigkeitsplots untersucht. Bei dem dynamischen Vorgang konnten nur augenblickliche Werte gewonnen werden. Die Fahrzeugbewegung gegen die Strömung hatte erhebliche negative Geschwindigkeiten zur Folge. Aus diesem Grund wurde bei der Darstellung auf die nichtgemittelte Geschwindigkeitskomponente u zurückgegriffen. Auf der horizontalen Ebene wurde die Zusammenwirkung der Staugebiete, Totwässer und Nachläufe der beiden Fahrzeuge gezeigt und in Zusammenhang mit wirkenden Luftwiderständen und Momenten gebracht. Die Darstellung der vertikalen Längsmittelschnitte hat zur Beschreibung der entstehenden Wirbelstrukturen auf beiden Fahrzeugen gedient. Bei einer Momentaufnahme konnten nur stochastisch entstehende und abgelöste Wirbel betrachtet werden. Der höhere PKW-Nachlauf bei den *slip* und *move* Simulationen hat seine Ursache in der unterschiedlichen Randbedingung auf der Fahrbahn (bewegte Wand bei dem dynamischen Vorgang vs. reibungsbehaftete Wand bei den statischen Positionen) und somit in unterschiedlichen Geschwindigkeitsprofilen in Bodennähe. Anhand einer horizontalen und einer vertikalen Ebene und sogenannter Volumenstromlinien wurden dreidimensionale Wirbelstrukturen und Änderungen des Totwassers beobachtet. Die *move* Variante bildet eine exakte Geschwindigkeitsverteilung ab, wie sie in der Realität auf der Straße herrscht. Sie hat zwar nicht die besten Ergebnisse geliefert, ihr Vorteil liegt aber in einer getreuen Abbildung der Strömungszustände. Die übliche Darstellung der Stromlinien war auch nicht möglich. Durch die gegebenen Stromlinien wurde die Wechselwirkung der Staugebiete mit den Totwässern gut sichtbar. Um die Wirbelstrukturen und deren Wechselwirkung besser zu visualisieren, wurde wieder das Q -Kriterium verwendet. Dadurch wurden unter anderem die Querwirbel, die Längswirbel, die Hufeisenwirbel und die Wirbeltüten, die auf den Fahrzeugen entstehen, sichtbar gemacht. Anhand des Q -Kriteriums konnte ebenso beobachtet werden, wie Ablösungen am Fahrzeug durch das benachbarte Fahrzeug beeinflusst wurden, wie die Nachläufe abgewichen wurden und ein von den anderen gespeist wurde. Schließlich wurden die relevanten turbulenten Größen und die Gitterqualität wieder nur in der kritischsten Position 0,39, diesmal aber bei allen drei Simulationsvarianten, dargestellt und ausgewertet. Bei dem Vergleich der turbulenten kinetischen Energie wurde sie bei den *slip* und *move* Varianten wegen der höheren Anströmgeschwindigkeit größer als bei den statischen Positionen. Der Zerfall der Wirbelstrukturen wurde bei dem kleineren Zeitschritt langsamer und somit die Dissipationsrate bei den *slip* und *move* Varianten deutlich schwächer als im Fall der statischen

Positionen. Die Gitterqualität wurde wieder auf der Oberfläche durch den dimensionslosen Wandabstand y^+ und räumlich durch die CFL-Zahl und die *delta/eta* Kennzahl ausgewertet. Bei identischer Gitterauflösung auf den Fahrzeugoberflächen in allen untersuchten Simulationen ist es zum Anstieg des y^+ auf dem PKW bei den *slip* und *move* Varianten wegen der größeren Fahrgeschwindigkeit gekommen. Auf dem LKW war aufgrund der schwächeren Interaktion der beiden Fahrzeuge die Geschwindigkeit bzw. das y^+ bei den *slip* und *move* Varianten kleiner. Das y^+ ist beim PKW von $y^+ \approx 20$ auf $y^+ \approx 30$ gestiegen. Bei den Maximalwerten von $y^+ \approx 60$ liegt der erste Zellmittelpunkt schon im logarithmischen Bereich, ist aber nicht zu weit entfernt. So konnte die Grenzschicht durch die hybride Wandfunktion getreu abgebildet werden. Die CFL-Zahl hat sich dank der Zeitschrittverfeinerung trotz der Geschwindigkeitserhöhung bei den *slip* und *move* Varianten in Vergleich zu den statischen Positionen reduziert. Wegen der fehlenden Anströmung bei der *move* Variante nimmt die CFL-Zahl in dem Außenbereich sehr niedrige Werte an. Bei der impliziten Zeitdiskretisierung spielt die Größe der CFL-Zahl trotzdem eine Nebenrolle. Die *delta/eta* Kennzahl ist bei den *slip* und *move* Varianten wegen der niedrigeren Dissipationsrate ebenso gesunken. Bei dem PKW-Totwasser ist von $\frac{\delta}{\eta} = 250$ (im Fall der statischen Positionen) auf $\frac{\delta}{\eta} \approx 50$ gesunken. Somit konnten durch das Gitter Wirbelstrukturen, die nur 50mal größer als die kleinsten Kolmogorov-Strukturen sind, erfasst werden, was deutlich näher dem empfohlenen Wert $\frac{\delta}{\eta} < 30$ aus LES liegt. Die kleinere Dissipation im Fall der *slip* und *move* Varianten hat auch einen Einfluss auf den f_k Parameter der PANS Simulationen. Dank der kleineren Dissipation wurde in der Formulierung im PANS Turbulenzmodell der f_k Parameter kleiner geschätzt. Dadurch wurde die Strömung in den Totwässern und in den Nachläufen der beiden Fahrzeuge zum großen Teil zum Auflösen bestimmt. Dass dort das Gitter auch dazu in der Lage ist, wurde durch das Verhältnis k_u zu k_{tot} bestätigt. Der kleinere Wert des f_k Parameters aus dem Verhältnis k_u zu k_{tot} als bei der f_k -Formulierung hat gezeigt, dass in den Gitterzellen der Anteil der aufgelösten kinetischen Energie größer war als abgeschätzt wurde. Im Gegensatz dazu wurde die Strömung in der rechteckigen Domäne außerhalb des *CAR_moving* Bereichs, wo sich grobe Zellen befinden und das bewegte Gitter sich dehnt, hauptsächlich modelliert. Die Änderung der Gitterweite wirkt störend auf die Mittelung des Geschwindigkeitsfeldes, die für die Bestimmung der aufgelösten kinetischen Energie notwendig ist.

Zu jedem Hauptkapitel gehört auch eine computertechnische Auswertung. Sie berichtet über die Hochleistungsrechner, die in jedem Kapitel verwendet wurden; konkret über die Kernanzahl, den Cache, die Mikroarchitektur der verwendeten Prozessoren, über den Knotenaufbau, der aus einer bestimmten Prozessoranzahl besteht und mit einer bestimmten Größe des Arbeitsspeichers disponiert, über die Schnittstelle, durch die die Knoten miteinander verbunden sind, und über das *Batch* System des verwendeten *Job Scheduler*.

Zu jeder berechneten Kalkulation wurde hier die Anzahl der verwendeten Prozessoren, die Anzahl der Iterationen und der Zeitschritte und die Rechenzeit aufgetragen. Die Berechnungen wurden dann anhand der CPU-Stunden miteinander verglichen. Dabei hat sich die Leistungsfähigkeit der Hochleistungsrechner und der Rechenaufwand der Simulationsverfahren herausgestellt. Generell performen die *AMD Opteron* Prozessoren deutlich schlechter als die *Intel Xeon* Prozessoren. Eine stationäre RANS Simulation ist offensichtlich schneller als eine instationäre URANS Simulation. Bei der hybriden PANS Simulation muss im Vergleich zu URANS zusätzlich ein gemittelttes Geschwindigkeitsfeld für die Abschätzung des f_k Parameters berechnet werden. Der Rechenmehraufwand beträgt ungefähr 10%, der bei dem Benefit, die Strömung zum Teil aufzulösen, mehr als akzeptabel scheint.

Um die Rechenressourcen effizient zu nutzen, wurde auch die Skalierbarkeit des *AVL Fire* Programms berücksichtigt. Anhand der PANS Simulationen wurde an unterschiedlich großen Gittern der erreichte *Speedup* gemessen und dem idealen gegenübergestellt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass es Sinn macht, kleinere Gitter mit niedrigerer Prozessoranzahl als bei den größeren zu berechnen. Je mehr Zellen das Gitter enthält, desto mehr lässt es sich parallelisieren. Bei den hier verwendeten älteren *AVL Fire* Versionen stellt die Größe eines Interface, das sich nur durch einen Single-Prozessor berechnen lässt, ein Hindernis dar und beschränkt somit den erreichbaren *Speedup*.

Zum Schluss der computertechnischen Auswertung wurden Hardwareanforderungen an den Arbeitsspeicher beim Einsatz von solchen Mehr-Millionen-Gittern erwähnt. Die Gittergenerierung, Gittermanipulation und die Ergebnisdarstellung erfolgt ausschließlich an einer lokalen Workstation. Solch eine hohe RAM-Anforderung kann die Mutterplatine mit dem normalen Desktop-Prozessor nicht unterstützen. Nicht nur deswegen sondern auch aus dem Grund, dass die Gittergenerierung durch *FAME Hexa* parallelisierbar ist, wurden am Fachgebiet

Server mit *Intel Xeon* Prozessoren in Dual-Ausführung angeschafft, die mit bis zu 96GB RAM bestückt wurden. Die Berechnung der Simulationen erfolgt dann meistens auf einem Hochleistungsrechner, während die Kalkulation in dem Arbeitsspeicher der einzelnen Knoten gespeichert wird. Bei einem Hochleistungsrechner ist die bestimmte Anforderung an den Arbeitsspeicher schwer zu ermitteln. Die Erfahrung hat aber gezeigt, dass der benötigte Arbeitsspeicher mit steigender Parallelisierung dramatisch zunimmt.

Literaturverzeichnis

- AVL LIST GmbH (2011): AVL Fire User's Manual – 04 CFD-Solver v2011 08 Main-Program, Graz.
- Ashton, N. and Revell, A. (2015a): Key factors in the use of DDES for the flow around a simplified car. *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol. 51, pp. 175-194, DOI: [10.1016/j.ijheatfluidflow.2015.06.002](https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2015.06.002)
- Ashton, N. and Revell, A. (2015b): Comparison of RANS and DES Methods for the DrivAer Automotive Body," *SAE Technical Paper Series*, Paper No. 2015-01-1538, DOI: [10.4271/2015-01-1538](https://doi.org/10.4271/2015-01-1538)
- Ashton, N., West, A., Lardeau, S. and Revell, A. (2016): Assessment of RANS and DES Methods for Realistic Automotive Models. *Computers and Fluids* 128:1-15, DOI: [10.1016/j.compfluid.2016.01.008](https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2016.01.008)
- Basara, B., Krajnovic, S., Girimaji, S. and Pavlovic, Z. (2011): Near-Wall Formulation of the Partially Averaged Navier–Stokes Turbulence Model. *AIAA Journal*, Vol. 49(12), pp. 2627-2636, DOI: [10.2514/1.J050967](https://doi.org/10.2514/1.J050967)
- Chang, C.-Y., Jakirlic, S., Dietrich, K., Basara, B. and Tropea, C. (2014): Swirling flow in a tube with variably-shaped outlet orifices: an LES and VLES study. *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol. 49, pp. 28-42, DOI: [10.1016/j.ijheatfluidflow.2014.05.008](https://doi.org/10.1016/j.ijheatfluidflow.2014.05.008)
- Chang, C.-Y., Jakirlic, S., Basara, B. and Tropea, C. (2015a): Predictive capability assessment of the PANS-model of turbulence. Part I: physical rationale by reference to wall-bounded flows including separation (pp. 371-383, DOI: [10.1007/978-3-319-15141-0_30](https://doi.org/10.1007/978-3-319-15141-0_30)) and Part II: application to swirling and tumble/mean-compression flows (pp. 385-398, DOI: [10.1007/978-3-319-15141-0_31](https://doi.org/10.1007/978-3-319-15141-0_31)). In 'Advances in Hybrid RANS-LES Modelling 5'. *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, Vol. 130, S. Girimaji, et al. (Eds.), Springer Verlag
- Chang, C.-Y. (2015b): Development and validation of scale-resolving models relevant to IC-engine flow configurations. PhD Thesis, *FG SLA, Technische Universität Darmstadt*, (Universitäts- und Landesbibliothek Darmstadt; <http://tuprints.ulb.tu-darmstadt.de/4315/>)
- Durbin, P.A. (1991): 1991. Near-wall turbulence closure modelling without damping functions. *Theor. Comput. Fluid Dyn.* Vol. 3, pp. 1-13, DOI: [10.1007/BF00271513](https://doi.org/10.1007/BF00271513)
- Ferziger, J. M., Peric, M. (2002): Computational Methods of Fluid Dynamics, 3. Auflage, Stanford USA und Nürnberg.
- Frank, T., Gerlicher, B. and Abanto, J. (2013): DrivAer - Aerodynamic Investigations for a New Realistic Generic Car Model using ANSYS CFD. Automotive Simulation World Congress, October, 2013, Frankfurt, Germany
- Fröhlich, J. and von Terzi, D. (2008): Hybrid LES/RANS methods for the simulation of turbulent flows. *Prog. Aerosp. Sci.*, Vol. 44, pp. 349-377, DOI: [10.1016/j.paerosci.2008.05.001](https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2008.05.001)
- Girimaji, S. S., Abdol-Hamid, K. S (2005): Partially-averaged Navier Stokes Model for Turbulence: Implementation and Validation. In: AIAA Paper 2005-502, S 1-14.
- Girimaji, S. S. (2006): Partially-Averaged Navier-Stokes Model for Turbulence: A Reynolds-Averaged Navier-Stokes to Direct Numerical Simulation Bridging Method. *ASME Journal of Applied Mechanics*, Vol. 73, pp. 413-421, DOI: [10.1115/1.2151207](https://doi.org/10.1115/1.2151207)
- Guilmineau, E. (2014): Numerical Simulations of Flow around a Realistic Generic Car Model. *SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.* 7(2):646-653, DOI: [10.4271/2014-01-0607](https://doi.org/10.4271/2014-01-0607)
- Gaylard, A., Oettle, N., Gargoloff, J., and Duncan, B. (2014): Evaluation of Non-Uniform Upstream Flow Effects on Vehicle Aerodynamics. *SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.* 7(2):692-702, DOI: [10.4271/2014-01-0614](https://doi.org/10.4271/2014-01-0614)

Han, X., Krajnovic, S. and Basara, B. (2013): [Study of active flow control for a simplified vehicle model using the PANS method](#). *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol. 42, pp. 139-150, DOI: [10.1016/j.ijheatfluidflow.2013.02.001](#)

Hanjalic, K., Popovac, M. and Hadziabdic, M. (2004): A robust near-wall elliptic-relaxation eddy-viscosity turbulence model for CFD. *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol. 25., pp. 1047-1051, DOI: [10.1016/j.ijheatfluidflow.2004.07.005](#)

Hanjalic, K. (2005): *Turbulence and Transport Phenomena, Modelling and Simulation*, Darmstadt.

Heft, A., Indinger, T. and Adams, N. (2012): Introduction of a New Realistic Generic Car Model for Aerodynamic Investigations. *SAE Technical Paper* 2012-01-0168, DOI: <http://dx.doi.org/10.4271/2012-01-0168>

Howell, J., Garry, K. and Holt, J. (2014): The Aerodynamics of a Small Car Overtaking a Truck. *SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.* 7(2):626-638, DOI: [10.4271/2014-01-0604](#)

Hucho, W. H. (2005): *Aerodynamik des Automobils, Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort*, 5. Auflage, Wiesbaden.

Islam, M., Decker, F., de Villiers, E., Jackson, A., Gines, J., Grahs, T., Gitt-Gehrke, A. and Comas i Font, J. (2009): Application of Detached-Eddy Simulation for Automotive Aerodynamics Development”, *SAE Technical Paper Series*, Paper No. 2009-01-0333, DOI: [10.4271/2009-01-0333](#)

Islam, A. and Thornber, B. (2017): High-order detached-eddy simulation of external aerodynamics over an SAE notchback model,” *The Aeronautical Journal* 121(1243):1342-1367, DOI: [10.1017/aer.2017.61](#)

Jakirlic, S. (2013a): *Turbulence Modelling and Simulation No3 Wall Treatment*, Darmstadt

Jakirlic, S., Kutej, L., Basara, B. and Tropea, C. (2014): Computational study of the aerodynamics of a realistic car model by means of RANS and hybrid RANS/LES approaches. *SAE Technical Paper Series*, Paper No. 2014-01-0594, pp. 1-14 (also in *SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems*, 2014; Vol. 7, No. 2, DOI: [10.4271/2014-01-0594](#)

Jakirlic, S. and Maduta, R. (2015): “Extending the bounds of “steady” RANS closures: towards an instability-sensitive Reynolds stress model. *Int. J. of Heat and Fluid Flow*, Vol. 51, pp. 175-194, DOI: [10.1016/j.ijheatfluidflow.2014.09.003](#)

Jakirlic, S., Kutej, L., Basara, B. and Tropea, C. (2016a): Numerische *Fahrzeugaerodynamik am Beispiel von ‚DrivAer‘ Modellkonfigurationen*. *Automobiltechnische Zeitschrift – ATZ*, Springer Verlag, Band 118, Ausgabe 5/2016, pp. 78-85 DOI: [10.1007/s35148-016-0012-6](#) (also as „Computational vehicle aerodynamics by reference to ‚DrivAer‘ model configurations“. *ATZ Worldwide* – <https://www.atz-magazine.com>, Vol. 118, Issue 5/2016, pp. 76-83, DOI: [10.1007/s38311-016-0008-6](#))

Jakirlic, S., Kutej, L., Hanssmann, D., Basara, B. and Tropea, C. (2016b): Eddy-resolving Simulations of the Notchback DrivAer Model: Influence of Underbody Geometry and Wheels Rotation on Aerodynamic Behaviour. *SAE Technical Paper Series*, Paper No. 2016-01-1062, pp. 1-14, DOI: [10.4271/2016-01-1602](#)

Jakirlic, S. (2017a): *Computational Aerodynamics No3 Evm Models*, Darmstadt.

Jakirlic, S. (2017b): *Computational Aerodynamics No4 Finite Volumen Methode*, Darmstadt.

Jakirlic, S. (2017c): *Computational Aerodynamics No5 Randbedingungen*, Darmstadt.

Jakirlic, S., Kutej, L., Unterlechner, P. and Tropea, C. (2017d): Critical assessment of some popular scale-resolving turbulence models for vehicle aerodynamics. *SAE International Journal of Passenger Cars – Mechanical Systems* V126-6EJ, 2017; Vol. 10, No. 1, pp. 235-250, DOI: [10.4271/2017-01-1532](#)

John, M., Buga, S.-D., Monti, I., Kuthada, T., Wittmeier, F., Gray, M. and Laurent, V. (2018): Experimental and Numerical Study of the DrivAer Model Aerodynamics. *SAE Technical Paper* 2018-01-0741, DOI: [10.4271/2018-01-0741](#)

- Jungmann, J., Schütz, T. Tropea C. and Jakirlic S. (2016): Flow past a DrivAer body in a scale model wind tunnel: computational study by reference to a complementary experiment, *International Conference on Vehicle Aerodynamics 2016: Aerodynamics by Design*, Institution of Mechanical Engineers, Coventry Transport Museum Millennium Place Coventry, UK, 21–22 September
- Jungmann, J. (2020): Eine experimentell validierte Methodik zur numerischen Simulation und Analyse des aerodynamischen und fahrdynamischen Verhaltens von Personenkraftwagen bei realitätsnaher, querdynamischer Fahrzeuganregung. PhD Thesis, *FG SLA, Technische Universität Darmstadt* (Universitäts- und Landesbibliothek Darmstadt, DOI: [10.25534/tuprints-00011646](https://doi.org/10.25534/tuprints-00011646))
- Kotapati, R., Keating, A., Kandasamy, S., Duncan, B., Shock, R. and Chen, H. (2009): The Lattice-Boltzmann-VLES Method for Automotive Fluid Dynamics Simulation, a Review. *SAE Technical Paper 2009-26-057*.
- Kozubková, M., Drábková, S. (2003): Numerické modelování proudění FLUENT I, Ostrava, Tschechische Republik.
- Krajnovic, S., Minelli, G. and Basara, B. (2016): Partially-averaged Navier-Stokes simulations of two bluff body flows. DOI: [10.1016/j.amc.2015.03.136](https://doi.org/10.1016/j.amc.2015.03.136)
- Kremheller, A. (2015): 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)
- Menter, F. and Egorov, Y. (2010): The Scale-adaptive Simulation method for unsteady turbulent flow predictions. Part 1: theory and model description. *Flow, Turbulence and Combustion* 85:113-138, DOI: [10.1007/s10494-010-9264-5](https://doi.org/10.1007/s10494-010-9264-5)
- Minelli, G., Adi Hartono, E., Chernoray, V., Basara, B. and Krajnovic, S. (2017): Validation of PANS and active flow control for a generic truck cabin. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 171, pp. 148-160, DOI: [10.1016/j.jweia.2017.10.001](https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.10.001)
- Mirzaei, M., Krajnovic, S. and Basara, B. (2015): [Partially-Averaged Navier-Stokes simulations of flows around two different Ahmed bodies](https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2015.05.010). *Computers and Fluids*, Vol. 117, pp. 273-286, DOI: [10.1016/j.compfluid.2015.05.010](https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2015.05.010)
- Noger, C., REGARDIN, C. and Szechenyi, E. (2005): Investigation of the transient aerodynamic phenomena associated with passing manoeuvres." *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 21, pp. 231-241, DOI: [10.1016/j.jfluidstructs.2005.05.013](https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2005.05.013)
- Popovac, M., Hanjalic, K. (2007): Compound Wall Treatment for RANS Computation of Complex Turbulent Flows and Heat Transfer. In: *Flow, Turbulence and Combustion* 78, S. 177-202.
- Schäfer, M. (2006): *Computational Engineering – Introduction to Numerical Methods*, Darmstadt.
- Schrefl, M. (2008): *Instationäre Aerodynamik von Kraftfahrzeugen: Aerodynamik bei Überholvorgang und böigem Seitenwind*. PhD Thesis, Technische Universität Darmstadt, Germany, Shaker Verlag Aachen, ISBN 978-3-8322-7010-0
- Schütz, T. (2012a): *Kraftfahrzeugaerodynamik*, Darmstadt.
- Schütz, T. (2012b): *Kraftfahrzeug-Aerodynamik K5 Beeinflussung der Luftkräfte am Fahrzeug*, Darmstadt.
- Schütz, T (2013): *Hucho - Aerodynamik des Automobils, Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort*, 6. Auflage, Wiesbaden.
- Spalart, P.R., Jou, W.-H., Strelets, M. and Allmaras, S. (1997): Comments on the feasibility of LES for wings and on a hybrid RANS/LES approach. *1st AFOSR Int. Conf. on DNS and LES*. In: Liu, C., Liu, Z. (Eds.), *Advances in DNS/LES*. Columbus, OH, Greyden Press, pp. 137-147.
- Spalart, P.R. (2009): Detached-Eddy Simulation. *Annu. Rev. Fluid Mech.* 41:181-202, DOI: [10.1146/annurev.fluid.010908.165130](https://doi.org/10.1146/annurev.fluid.010908.165130)

Spurk, J. H., Aksel, N. (2010): Strömungslehre, Einführung in die Theorie der Strömungen, 8. Auflage, Bad König und Bayreuth.

Wilcox, D. C. (1994): Turbulence Modeling for CFD, La Cañada, USA.

Wordley, S. and Saunders, J. (2008): On-road Turbulence," *SAE Int. J. Passeng. Cars - Mech. Syst.* 1(1):341-360, DOI: [10.4271/2008-01-0475](https://doi.org/10.4271/2008-01-0475)

Wordley, S. and Saunders, J. (2009): On-road Turbulence: Part 2. *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* 2(1):111-137, 2009, [10.4271/2009-01-0002](https://doi.org/10.4271/2009-01-0002)

Einstellungen des Löfers (*RealCar*)

In diesem Anhang werden alle Einstellungen des AVL Fire Löfers nicht nur für Fälle aus dem Kapitel 4 Umströmung eines realistischen Fahrzeuges (*RealCar*) sondern auch für alle Fälle aus den Kapiteln 3 Umströmung eines vereinfachten Fahrzeuges (*SingleCar*): Gitterstudie, 5 Quasi-stationärer PKW-LKW Überholvorgang (*RealCar and Truck*) und 6 Dynamischer PKW-LKW Überholvorgang (*RealCar and Truck – Passing*) detailliert beschrieben. Die gewählte Reihenfolge entspricht dem Angebot in *AVL Fire GUI*. In dieser Arbeit wurde ausschließlich mit der Version *AVL Fire v2011.1* gerechnet. Fälle mit bewegendem Gitter im Kapitel 6 Dynamischer PKW-LKW Überholvorgang (*RealCar and Truck – Passing*) wurden mit der Version *AVL Fire v2013.2* simuliert. Beide diese Versionen unterscheiden sich nicht bei hier verwendeten Einstellungen im *AVL Fire GUI*.

- **Run Mode:** in diesem Abschnitt wird im *AVL Fire GUI* definiert, ob die Berechnung stationär oder instationär wird. Die RANS (Reynolds-averaged Navier Stokes) Simulation wird stationär berechnet. Bei den instationären URANS (Unsteady Reynolds-averaged Navier Stokes) und PANS (Partially-averaged Navier Stokes) Berechnungen wird der Zeitschritt Δt und die Endzeit, bei der die Kalkulation terminiert wird, festgestellt.
 - *Steady / Timestep:* entspricht einer stationären RANS bzw. instationären URANS oder PANS Berechnung,
 - *Delta_t:* stellt den Zeitschritt Δt bei einer instationären Berechnung fest. In diesem Kapitel wurde ausschließlich mit $\Delta t = 0,001s$ gerechnet,
 - *End time:* bei dieser Zeitangabe wird die Berechnung gestoppt, falls sie nicht früher beim Erreichen der Konvergenz aufhört. Die Endzeit ist auf $t = 10,3s$ gestellt. So lange dauern nämlich 20 so genannten *Flow through Times*. Angabe *Flow through Time* bedeutet, wie lange ein Teilchen braucht, um die Rechendomäne zu passieren:
$$FTT = \frac{L}{u_\infty} = \frac{20}{38,89} \approx 0,515s \quad (A.1)$$
Damit zu einer ausreichenden Mittelung kommen könnte, wurde eine Anzahl von $20FTT$ gewählt:
$$20FTT = 20 \cdot 0,515s = 10,3s \quad (A.2)$$
 - *Second order:* ermöglicht zeitliche Diskretisierung zweiter Ordnung Genauigkeit zu verwenden. Dieses implizite Mehrschrittverfahren wird bei den URANS und PANS Berechnungen benutzt.
 - *Restart without time information:* löscht die zeitliche Angabe bei einem Simulationsstart. Dies wird bei dem Erststart der PANS Simulationen benutzt.
- **Module activation:** bei diesem Angebot wird kein zusätzliches Modul benötigt.
- **Boundary conditions:** hier werden die Randbedingungen definiert. Sie variieren zwischen den Fällen, je nach was untersucht wird.
 - *inlet:* die Eigenschaften auf der Einlassebene werden wie folgt definiert:
 - *Inlet/Outlet: Normal Velocity,* dadurch wird eine konstante Geschwindigkeit senkrecht zu der Einlassebene definiert,
 - *Normal Velocity:* $U_\infty = 38,89ms^{-1}$, Angabe mit positivem Vorzeichen bestimmt, dass das Fluid in die Rechendomäne eintritt,
 - *Fixed temperature: yes, Temperature = 293,15K,* so wird die Temperatur des eintretendes Fluides definiert. Die Energiegleichung wird zwar nicht gerechnet, diese Angabe ist aber für die Dichte und Viskosität von Bedeutung,
 - *Fixed scalar: yes, Scalar = 0,* bedeutet, dass keine chemische Reaktion berechnet wird,
 - *Fixed turbulence: yes, Turbulence kinetic energy = 0,001m²s⁻²,*
Turbulence length scale = 0,001m, Turbulence diddipation rate = 0,0051961m²s⁻³, bei diesen drei turbulenten Größen werden zwei eingegeben und die dritte automatisch nach dieser Beziehung ausgerechnet:
$$\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} = 0,09^{3/4} \frac{0,001^{3/2}}{0,001} = 0,0051961m^2s^{-3}, \text{ wo } C_\mu = 0,09 \quad (A.3)$$

Aus der angegebenen turbulenten kinetischen Energie kann rückwertig die turbulente Intensität I definiert werden:

$$k = \frac{3}{2}(U_\infty I)^2 \quad (\text{A.4})$$

$$I = \frac{\left(\frac{2}{3}k\right)^{1/2}}{U_\infty} = \frac{\left(\frac{2}{3} \cdot 0,001\right)^{1/2}}{38,89} = 0,000664 \quad (\text{A.5})$$

Die turbulente Intensität ist damit sehr gering, wie bei den Windkanälen üblich ist.

- *outlet*: definiert Eigenschaften auf der Auslassebene:
 - *Inlet/Outlet: Static Pressure, Pressure* = 100000Pa, auf der Auslassebene wird Umgebungsdruck vorgegeben. Diese Einstellung wurde am Anfang bei RANS und URANS Simulationen verwendet,
 - *Inlet/Outlet: Gradient* = 0 – *all variables*, diese Randbedingung bringt eine bessere Konvergenz vor allem bei PANS Berechnung und wurde später im Laufe der Zeit ebenso bei RANS und URANS verwendet. Sie verwendet eine Neumann-Randbedingung an der Auslassebene.
- *symmetry*: - *Symmetry*, eine Symmetrieebene wird nur bei den *IO* Fällen benutzt, wodurch die Randbedingungen an der linken, rechten und oberen Seite des Rechtecks definiert werden,
- *inlet-BLC*: durch eine weitere Einlassebene wird die Grenzschichtabsaugung (*BLC - Boundary Layer Control*) simuliert:
 - *Inlet/Outlet: Normal Velocity*, durch diese Einstellung wird wieder senkrecht zur Ebene, hier zu dem Boden, abgesaugt,
 - *Normal Velocity*: $u = -2,7\text{ms}^{-1}$, ein negatives Vorzeichen sorgt dafür, dass das Fluid aus der Domäne abgesaugt wird. Weil die Menge des abgesaugten Volumens bei dem BMW Windkanal ein Geschäftsgeheimnis darstellt, wurde an die Theorie zurückgegriffen, siehe Kapitel 2.3.5 Grundlagen der Windkanalmessung, Seite 44. Die Absauggeschwindigkeit u_j und Anströmgeschwindigkeit U_∞ stehen in einem Verhältnis: $u_j/U_\infty = 0,07$,

$$u_j = 0,07U_\infty = 0,07 \cdot 38,89 = 2,7223 \approx 2,7\text{ms}^{-1} \quad (\text{A.6})$$

Das abgesaugte Volumen wird berechnet als:

$$\dot{V} = u_j B s = 2,7 \cdot 5,77 \cdot 1,04294 = 16,248\text{m}^3\text{s}^{-1} \quad (\text{A.7})$$

Weiter werden nur die Angaben erwähnt, die sich von der vorherigen Beschreibung der Einlassebene unterscheiden:

- *Fixed turbulence: yes, Turbulence kinetic energy* = $0,0001\text{m}^2\text{s}^{-2}$,
Turbulence length scale = $0,0003286\text{m}$, *Turbulence diddipation rate* = $0,0005\text{m}^2\text{s}^{-3}$, aufgrund einer besseren Konvergenz wurden diese drei turbulenten Größen sehr klein gewählt.

- *outlet-BLC*: durch diese Einlassebene wird das Fluid, das bei der Grenzschichtabsaugung abgesaugt wurde, wieder in die Rechendomäne rein gelassen. Bei der Absaugung wurde der Strömung ein Volumen abgenommen. Wenn dieses Volumen nicht wieder zugefügt würde, würde dadurch die Hauptströmung verlangsamt, was sich an den an das Fahrzeugmodell wirkenden Kräften negativ ausübt würde.
 - *Inlet/Outlet: Velocity*, diese Einstellung ermöglicht eine separate Definition der Geschwindigkeit für jede Komponente:
 - *Velocity u*: $u_x = 2\text{ms}^{-1}$,
 - *Velocity v*: $u_y = 0\text{ms}^{-1}$,
 - *Velocity w*: $u_z = 2\text{ms}^{-1}$, die zurückzugefügte Strömung tritt in die Domäne unter einem 45° Winkel ein. Der Volumenstrom bleibt konstant $\dot{V} = 16,248\text{m}^3\text{s}^{-1}$, nur die Geschwindigkeit wird an andere Fläche angepasst:

$$u_j = \frac{\dot{V}}{s_B} = \frac{16,248}{0,94122 \cdot 6,09} = 2,835\text{ms}^{-1}, \text{ für die Geschwindigkeitskomponenten gilt dann:}$$

$$u_j^2 = u_x^2 + u_z^2 \text{ und } u_x^2 = u_z^2 \text{ danach ist}$$

$$u_x = u_z = \frac{u_j}{\sqrt{2}} = \frac{2,835}{\sqrt{2}} = 2,004 \approx 2\text{ms}^{-1},$$

- *Fixed turbulence: yes, Turbulence kinetic energy = $0,0001m^2s^{-2}$, Turbulence length scale = $0,0003286m$, Turbulence diddipastion rate = $0,0005m^2s^{-3}$.*
- *ground_BLC:* Bei den Fällen *Wheels_IO-BLC-* ist die Grenzschichtabsaugung durch einen reibungsfreien Boden simuliert:
 - *Wall:* Es handelt sich um eine Randbedingung auf der Wand,
 - *Movement: Velocity $u = 0ms^{-1}$, Velocity $v = 0ms^{-1}$, Velocity $w = 0ms^{-1}$,*
 - *Thermal: Temperature = $293,15K$,*
 - *Slipwall:* aktiviert, dadurch gilt dann die Gleichung (2.238): $\left(\frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_2}\right)_{slip} \neq 0$.
- **Fluid properties:** bei dem Definieren der Fluideigenschaften wurde eine vordefinierte Einstellung für die Luft benutzt. Dabei kann nur die Prandtl-Zahl geändert werden. In dieser Arbeit wurde aber aus dem Default-Wert ausgegangen:
 - *Fluid properties of: AIR,*
 - *Turbulent Prandtl No.: 0,9.*
- **Initial conditions:** aus folgenden Werten werden immer nur die RANS Simulationen initialisiert, während URANS und PANS mit einem Feld aus der vorherigen Simulation initialisiert werden. Bei der RANS Initialisierung wurden folgende Einstellungen verwendet:
 - *Pressure = $100000Pa$,*
 - *Density = $1,18858kgm^{-3}$ (nicht editierbar),*
 - *Temperature = $293,15K$,*
 - *Turbulence kinetic energy = $0,0001m^2s^{-2}$, Turbulence length scale = $0,0003286m$, Turbulence diddipastion rate = $0,0005m^2s^{-3}$,*
 - *Velocity $u = 0ms^{-1}$ ($38,89ms^{-1}$), Velocity $v = 0ms^{-1}$, Velocity $w = 0ms^{-1}$, der Wert im Klammer gilt für die IO Fälle,*
 - *Scalar = 0,* die Angaben entsprechen den Werten, die auf der Einlassebene definiert wurden. Bei einer inkompressiblen Strömung ist die Dichte konstant und in *Fluid properties* vordefiniert, sie kann nicht weiter editiert werden,
 - *Initialization mode: uniform initialization,* diese Art der Initialisierung verwendet die hier definierten Geschwindigkeitskomponenten in jeder Zelle der Domäne. Eine Initialisierung aus dem maximalen Wert der Geschwindigkeit, die bei den IO Fällen verwendet wurde, ist zwar empfindlicher was die Konvergenz angeht, bietet aber eine schnellere Entwicklung der Strömung und einen schnellen Anstieg der an das Fahrzeugmodell wirkenden Kräften, als wenn aus dem Nullwert bei den Fällen mit dem Windkanalgitter initialisiert wurde. Dort ist wegen der ruhenden Luft im Plenum die Initialisierung mit Nullgeschwindigkeit notwendig,
- **Additional terms:** in diesem Angebot kann der Einfluss der Volumenkraft und der Rotation berücksichtigt werden. Weder das eine noch das andere tritt in dieser Arbeit auf:
 - *Gravitational body force:*
 - *Body force: No,* alle Simulation in dieser Arbeit werden ohne Gravitationskraft berechnet, auf das Fluid wirkt keine zusätzliche Volumenkraft.
- **Solver control:** hier wird die Einstellung des Löser für sowohl stationäre als auch instationäre Simulationen spezifiziert:
 - *Discretization:* bei Diskretisierung der Variabler sind folgende Einstellungen möglich:
 - *Calculation of boundary values:* *Extrapolate,* dadurch wird der Druck auf der Oberfläche berechnet. Diese Option wird vor der *Mirror* Methode bevorzugt, wenn die Zellschicht an der Oberfläche aus hexagonalen Zellen besteht,
 - *Calculation of derivatives:* *Least Sq. Fit,* bei der Berechnung des Gradients $\nabla\phi$ eines Wertes ϕ wird die Methode der kleinsten Quadrate (*linear least squares*) vor dem Green-Gauß Theorem bevorzugt, weil sie genauer ist. Näher zur Theorie siehe Kapitel 2.2.5 Gradienten-Approximation, Seite 28,
 - *Variable Limits, - Cell quality check, - Cell face adjustment – geometry, - Realizability Constrains, - Decoupled Domains: No,* alle diese Angebote sind auf dem Default-Wert *No* geblieben. Eine Verbesserung der Konvergenz durch ihre Einschaltung wurde nicht nötig,

- *Cell face adjustment – equation: yes*, als einzige Änderung wurde von der Beschränkung der Kreuzdiffusion Gebrauch gemacht,
- *Simple*: die Druckkorrelation wird durch das SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equations) Verfahren gelöst. Konvergenz der inneren Iterationen ist zufriedenstellend, eine zweite Druckkorrektur durchzuführen wie bei dem PISO Algorithmus ist nicht erforderlich. Für eine ausführliche Erklärung wird der Leser auf das Kapitel 2.2.7 Druckgeschwindigkeitskopplung, Seite 29 verwiesen.
- *Differencing scheme*: in der Finite-Volumen-Methode werden die Knotenwerte von Variable ϕ nur in der Mitte der Kontrollvolumina (KV) berechnet. Um den konvektiven Fluss über die Ränder des KV zu berechnen, werden die Werte an den KV-Flächen in Bezug auf den Knotenwert in KV-Mitte approximiert. Für mehrere Informationen zur Diskretisierung siehe Kapitel 2.2.4.1 Konvektiver Fluss, Seite 24:
 - *Momentum: MINMOD Relaxed, Blending factor 1*, bei der Impulsgleichung wird ein TVD (*total variation diminishing*) Schema benutzt. Es ist eine Kombination von UDS, CDS und LUDS Schemata. Durch den Blendingfaktor kann das Schema mit dem UDS (*upwind differencing scheme*) Schema erster Ordnung Genauigkeit geblendet werden, was hier aber nicht benutzt wird,
 - *Continuity: AVL SMART Relaxed, Blending factor 1*, Diskretisierung für die Kontinuitätsgleichung,
 - *Turbulence: MINMOD Relaxed, Blending factor 1*, Diskretisierung für die k -, ε -, ζ -, f -Gleichung.
- *Linear solver*: das Lineargleichungssystem wird durch folgende Iterationsmethoden gelöst. Mehr zu in *AVL Fire* verwendeten Iterationsmethoden siehe Kapitel 2.2.9 Iteratives Lösungsverfahren, Seite 32:
 - *Momentum: GSTB, Min iteration 0, Max iteration 50, Tolerance 0,1*, bei der Impulsgleichung wurde die iterative Methode BiCGSTAB (*biconjugate gradients stabilized*) mit Vorbedingung (*precondition*) durch *incomplete Cholesky factorization* verwendet,
 - *Continuity: AMG, Min iteration 0, Max iteration 50, Tolerance 0,01*, bei der Kontinuitätsgleichung dann die Multigrid Methode. Sie eignet sich gut für komplexe Probleme, braucht aber um 50% mehr Arbeitsspeicher,
 - *Turbulence: GSTB, Min iteration 0, Max iteration 50, Tolerance 0,1*, die iterative Methode BiCGSTAB wurde bei den Lineargleichungen für k , ε , ζ , f benutzt.
- *Convergence criteria*: eine stationäre Simulation wird entweder nach bestimmter Iterationsanzahl, oder beim Erreichen der Residuumtoleranz konvergieren. Bei einer instationären Simulation wird mit einem neuen Zeitschritt angefangen. Die durchgeführte Anzahl der äußeren Iterationen und die gewünschte Toleranz der Residuen wird in diesem Abschnitt wie folgt definiert:
 - *Max number of iterations: 50000 RANS, 10 URANS, 15 PANS*, bedeutet die maximale Anzahl von Iteration bei RANS in der Berechnung, bei URANS und PANS innerhalb eines Zeitschritts,
 - *Min number of iterations: 5*, wird aber nicht gebraucht,
 - *Normalized residuals*: der absolute Wert von Summe des Residuums Variable ϕ wird normiert wie folgt (vgl. AVL 2011: 2-70):

$$\frac{\sum_{i=1}^M |a_p^* \phi_p - \sum_{j=1}^{n_i} a_j \phi_{p_j} - S_\phi^*|}{\sum_{i=1}^M a_p^* \phi_p} \quad (\text{A.8})$$
 - *Pressure: 10^{-9}* ,
 - *Momentum: 10^{-15}* , das Konvergenzkriterium für die Impulsgleichung wird absichtlich so niedrig gesetzt, damit die Berechnung nicht frühzeitig konvergiert und zwingend die maximale Anzahl von Iterationen durchführt,
 - *Turb. kin. energy: 10^{-9}* ,
 - *Turb diss. rate: 10^{-9}* .
- **Equation control**: hier wird die Einstellung des Lösers sowohl für stationäre als auch für instationäre Simulationen spezifiziert:

- *Activate equations*: in diesem Menü wird eingestellt, welche Differentialgleichung berechnet wird und weitere Strömungseigenschaften, die für den Löser relevant sind:
 - *Momentum & Continuity*: *yes*, diese Einstellung verrät, dass sowohl die Impuls- als auch die Kontinuitätsgleichung berechnet werden,
 - *Turbulence: k-zeta-f, PANS*, für die RANS und URANS Simulationen wird das $k - \varepsilon - \zeta - f$ Turbulenzmodell verwendet. PANS (*Partially-averaged Navier Stokes*) ist ein hybrides Turbulenzmodell, das nahtlos zwischen RANS und DNS umschaltet,
 - *Energy*: *No*, die Energiegleichung wird nicht gerechnet,
 - *Scalar*: *No*, ebenso wird mit keinen chemischen Reaktionen gerechnet,
 - *Pressure reference cell*: 27684463 *test3-3-G-8i-2b_IO_RealCar.flm*, 27880786 *test3-3-G-7i-8b_IO_RealCar.flm*, 30574238 *test3-3-G-7i-8b_RealCar.flm*, diese Zellnummer gehört der Zelle, deren Druck als Referenzdruck dient. Sie befindet sich immer in der Mitte der oberen Hälfte der Einlassebene, wo zu erwarten ist, dass die Strömung am wenigsten gestört wird,
 - *Two stage pressure correction*: *No*, eine zweifache Druckkorrelation ist bei dieser Strömungsart nicht nötig,
 - *Compressibility: Incompressible*, die Strömungsgeschwindigkeit liegt weit unter der Grenze, wo die kompressiblen Effekte auftreten: $Ma = \frac{U}{a} = \frac{38,89}{343} = 0,113 < 0,3$ Deswegen wird das Fluid als inkompressibel betrachtet.
 - *Wall Treatment: Hybrid Wall Treatment*, die hybride Wandfunktion (*compound wall treatment*) verbindet durch eine Blendingfunktion die Integration bis zur Wand mit der Standardwandfunktion. Sie ist in Kombination mit den $k - \varepsilon - \zeta - f$ und PANS Turbulenzmodellen bevorzugt. Weitere Informationen zu hier verwendete hybride Wandfunktion sind im Kapitel 2.2.3 Wandbehandlung: Wandfunktionen, Seite 20 beschrieben.
- *Underrelaxation factors*: durch die Unterrelaxation wird bestimmt, wie sich eine bestimmte Variable ϕ von einer äußeren Iteration zu einer neuen äußeren Iteration ändern kann. Der Unterrelaxationsfaktor α_ϕ kann zwischen ($0 < \alpha_\phi \leq 1$) variieren. Eine starke Unterrelaxation bringt bessere Konvergenz, verlängert aber die Simulationszeit. Umgekehrt eine schwache Unterrelaxation führt zu einer schnellen Lösung, kann aber instabil werden. Es ist nötig dazwischen ein Optimum zu finden. Mehr dazu siehe Kapitel 2.2.8 Unterrelaxation, Seite 31,
 - *Momentum*: 0,6, entspricht $\alpha_\phi = 0,6$ und dieser Anteil der neuen Lösung der Impulsgleichung wird in der neunten äußeren Iteration benutzt. Der Rest wird aus der vorherigen äußeren Iteration genommen:

$$\phi^m = \phi^{m-1} + (\phi^m - \phi^{m-1})\alpha_\phi = \phi^{m-1} + (\phi^m - \phi^{m-1}) \cdot 0,6 = 0,6\phi^m + 0,4\phi^{m-1}$$
 - *Pressure*: 0,1, wird bei der Druckkorrelation eingesetzt,
 - *Turb. kin. energy*: 0,4
 - *Turb. diss. rate*: 0,4
 - *Mass source, - Viscosity*: 1 werden nicht unterrelaxiert.
- **Output control**: in diesem Abschnitt werden die Ausgabeigenschaften definiert. Als *2D result* werden die Ausgaben genannt, die auf eine Fläche oder auf einen Punkt bezogen sind, oder die, wo nur eine Textform reicht. Die *.fla* Datei stellt so genanntes *Log-file* im ASCII Format dar. Hier werden die Residualen aus jeder Iteration und verschiedene Strömungseigenschaften und wirkende Kräfte in vordefinierter Frequenz aufgezeichnet. Diese *2D Results* werden auch in die Datei *.fl2* und in binäres *Log-file .flb* gespeichert. Als *3D Results* werden ebenso mit einer vordefinierten Frequenz die Strömungsvariable aufgezeichnet.
 - *Write 2D result file*: *User defined*, dadurch werden die *2D Results* mit benutzerdefinierter Frequenz aufgezeichnet. Die Eingabe erfolgt durch eine Tabelle:

Tabelle A.1: Ausgabefrequenz der *2D Results* bei stationären und instationären Simulationen.

RANS				URANS / PANS			
	upto/at	iterations	each iteration		upto/at	time [s]	each [s]
1	upto	50000	100	1	at	0	
				2	upto	10,3	0,005

- ☑ *Flow quantities*, durch die Aktivierung werden *Inlet Mass Flow*, *Outlet Mass Flow*, *Total Mass*, *Mean Pressure* aufgezeichnet,
- ☑ *Turbulence quantities*, dadurch dann *Mean Turbulent Kinetic Energy*, *Mean Dissipation Rate*, *Mean Turbulent Time Scale*,
- ☑ *Wall summary*, dabei für jede Wand y^+ ,
 - *Sel. for 2D output: car_n_wheels*, auf diesem *Selection* werden Werte aufgezeichnet, die durch eine Formel berechnet werden. Hier sind die Kräfte und Momente in allen drei Achsen, die dann auf Kraft- und Momentenbeiwerte normiert werden. Als Beispiel für die Berechnung des Kraftbeiwertes wird *Formula Drag_cD*- gezeigt:

```
#define SEL_x_y_z_force_component 0
#define REAL_reference_velocity 38.89
#define REAL_reference_density 1.189
#define REAL_projection_area 0.351066

$$init

if(init==0)print "car_n_wheels - cD: ",sum;

$$formula
// WORKS ONLY FOR BND-FACE-SELECTIONS!
double shearForce[3];
if(index >= NBFAC) return 0.0;
COMPUTE_WALL_SHEAR_FORCE(index, shearForce);
return (shearForce[SEL_x_y_z_force_component] +
ap*n[SEL_x_y_z_force_component]) / (0.5*REAL_reference_velocity*REAL_reference_velocity*REAL_referenc
e_density*REAL_projection_area);
```

Formel in *AVL Fire* besteht aus drei Teilen: *Global Formula Variables*, *Formula Initialization* und *Formula Body*. Für die Kraftkomponenten gilt: $x = 0, y = 1, z = 2$. Die Projektionsfläche des Fahrzeugmodells beträgt $A = 0,351066m^2$. Die wirkende Kraft besteht aus der Reibungs- und Druckkraft, hier als *shearForce* und *ap* (*absolute pressure*) genannt. Ähnlich wird der Momentenbeiwert gerechnet. Gezeigt wird die Formel *Moment_cMx*-:

```
#define PT_rotation_axis_center {0.5675, 0, -0.139}
#define VEC_rotation_axis_direction {1, 0, 0}

#define REAL_reference_velocity 38.89
#define REAL_reference_density 1.189
#define REAL_projection_area 0.351066
#define length 1.155

double c[3];
double a[3];

$$init
c = PT_rotation_axis_center;
a = VEC_rotation_axis_direction;
a /= |a|; // direction vector must be scaled
if(init==0)print "car_n_wheels - cMx: ",sum;

$$formula
// return torque around rotation axis due to pressure onto face
return ( (( ap*n) ^ (x-c) ) . a) /
(0.5*REAL_reference_velocity*REAL_reference_velocity*REAL_reference_density*REAL_projection_area*len
gth));
```

Der Mittelpunkt der Rotationsachse befindet sich in Radstandmitte, Spurmitte und auf Höhe der Fahrbahn. Der Momentenbeiwert wird noch durch den Radstand normiert, der beträgt: $l = 1,155m$. In diesem Beispiel handelt es sich um das Rollmoment M_x , das um die x-Achse auftritt. Durch diese Formel werden Momente berechnet, die negativ zum Rechtshandsystem sind!

- *Sel. for 2D output: car_wo_wheels*, um den Einfluss der Räder zu untersuchen wurden auch die Kraft- und die Momentenbeiwerte auf der Fahrzeugoberfläche ohne Räder ausgewertet,
- *Write 3D result file*: In diesem Kapitel wurde von dem traditionellen *.fl3* Format Gebrauch gemacht. Die *.fl3* Ausgabe wird auf mehrere Teile verteilt, die nicht größer als 1GB werden:
 - *FIRE v8.0 – v2009*: dadurch wird das *.fl3* Format aktiviert. Dieses *.fl3* Format wurde wegen einem schnelleren Kopieren von großen Dateien vor dem neunten *3D_Results* Format, das aus vielen kleinen Dateien besteht, bevorzugt,
 - *Output frequency*: steht für benutzerdefinierte Ausgabe von *3D Results*. Bei RANS werden sie jede 5000ste Iteration ausgeschrieben, bei URANS und PANS wird wieder eine tabellarische Eingabe verwendet:

Tabelle A.2: Ausgabefrequenz der *3D Results* bei instationären Simulationen.

	upto/at	time [s]	each [s]
1	upto	10,3	0,515
URANS / PANS			

Weiter wird definiert, welche Strömungsvariable ausgeschrieben werden sollen:

- *Density*: No,
- *Mach number*: No,
- *Passive scalar*: No,
- *Pressure*: Yes,
- *Temperature*: No,
- *Turbulence kinetic energy and dissipation rate*: Yes,
- *Velocity*: Yes,
- *Viscosity*: No,
- *Vorticity*: Yes: mit dieser Ausgabe ist auch die Ausgabe vom Q-Invariant verbunden,
- *Wall heat transfer*: No,
- *Momentum error*: No,
- *Residual enthalpy*: No,
- *Residual pressure*: No,
- *Residual turbulence dissipation rate*: No,
- *Residual turbulence kinetic energy*: No,
- *New quantity by formula: CFL_Number*:-: durch eine Formel wurden zusätzliche Variable berechnet und ausgegeben. Hier ist das die CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) Zahl. Sie gibt an, um wie viele Zellen sich die Strömung fortbewegt:

$$CFL = \frac{u\Delta t}{\Delta x} \quad (A.9)$$

Sie wird zur Stabilitätsanalyse numerischer Berechnungen benutzt. Bei einer expliziten Zeitdiskretisierung kann die Berechnung nur mit $CFL < 1$ stabil sein. Implizite Zeitdiskretisierung lässt auch $CFL > 1$ zu.

```
double CFL;
double vmag;

$$init

$$formula
vmag=sqrt((v[0]**2)+(v[1]**2)+(v[2]**2));
CFL = (vmag*DT)/(vol**0.333);
return CFL;
```

Im Code bedeutet *DT* den verwendeten Zeitschritt und *vol* die einzelnen Zellvolumen.

- *New quantity by formula: delta/eta*:-: diese Kennzahl beschreibt, wie gut das numerische Gitter die kleinsten Wirbelstrukturen (Kolmogorov-Längenskala) auflösen kann:

$$\frac{\delta}{\eta} = \frac{(\nabla_{vol})^{1/3}}{\left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4}} \quad (A.10)$$

```
$$init
```

```
$$formula
double eta, delta;
eta=pow(pow(VIM,3.0)/dr, 0.25);
delta=pow(vol,0.3333);
return delta/eta;
```

Zum Erläutern der hier verwendeten Variablen bedeutet *VIM* (*molecular viscosity*), es ist also die dynamische Viskosität und *dr* ist die Dissipationsrate.

- *Write restart file.* *Write restart file*, die Ausgabe von der *.rs* Datei wird nicht aktiviert. Diese Datei wird zu einem Neustart der Simulation benutzt. Bei dem Dateientyp *.rs* wird immer nur ein aktueller und ein alter Anhaltspunkt gespeichert. Ein neuer Anhaltspunkt überschreibt dann den alten. Wegen einer geringen Anzahl von den Anhaltspunkten, wurde lieber die zweite Ausgabevariante ausgewählt,
- *Write backup file.* *Write backup File*, aktiviert die Ausgabe von der *.bc* Datei mit einer durch die Tabelle benutzerdefinierten Frequenz:

Tabelle A.3: Ausgabefrequenz der *backup* Dabei bei stationären und instationären Simulationen.

RANS				URANS / PANS			
	upto/at	iterations	each iteration		upto/at	time [s]	each [s]
1	upto	50000	1000	1	upto	10,3	0,05

Die *.bc* Datei wird durch die Iteration bzw. durch den Zeitschritt gekennzeichnet, zu der sie ausgeschrieben wurde und so wird sie nicht überschrieben. Der Vorteil ist, dass die Simulation aus jedem gespeicherten Anhaltspunkt neugestartet werden kann,

- *Log file. Monitoring locations: cell no. = 23090198*, als Beispiel wurde der Case *Wheels-BLC-PANS* ausgewählt. Diese Eingabe bezieht sich auf die *.fla* Datei. Dort werden unter anderem die absoluten Residualen von bestimmten Variablen und die Strömungseigenschaften in hier definierter Zelle für jede Iteration aufgezeichnet. Bild A.1 zeigt einen Ausschnitt aus der *.fla* Datei für den Case *Wheels-BLC-PANS*.

```
*****
* 10300. Time Step Time = 0.1030000000E+02 dt = 0.1000E-02 *
*****
ITER I***** Absolute Residual Source Sums *****I I***** Field Values at Monitoring Location 23090198 *****I
```

NO.	RESU	RESV	RESW	RESM	RESK	RESD	RESH	U	V	W	P	TKIN	DISP	TEMP
1	1.00E-03	9.08E-04	9.15E-04	4.92E-02	3.02E-02	5.54E-03	0.00E+00	-1.46E-02	1.83E-01	4.78E-03	3.65E+01	4.50E-01	7.78E+03	0.00E+00
2	4.89E-04	4.39E-04	4.43E-04	4.80E-02	4.31E-04	9.56E-03	0.00E+00	-1.45E-02	1.82E-01	4.80E-03	3.65E+01	4.49E-01	7.75E+03	0.00E+00
3	2.45E-04	2.17E-04	2.20E-04	3.97E-02	3.13E-04	2.35E-02	0.00E+00	-1.45E-02	1.81E-01	4.79E-03	3.65E+01	4.48E-01	7.72E+03	0.00E+00
4	1.27E-04	1.10E-04	1.12E-04	3.43E-02	2.43E-04	1.49E-02	0.00E+00	-1.44E-02	1.81E-01	4.78E-03	3.65E+01	4.46E-01	7.68E+03	0.00E+00
5	7.01E-05	5.85E-05	6.00E-05	3.46E-02	1.97E-04	1.31E-02	0.00E+00	-1.44E-02	1.80E-01	4.75E-03	3.66E+01	4.45E-01	7.63E+03	0.00E+00
6	4.27E-05	3.38E-05	3.49E-05	3.48E-02	1.64E-04	1.88E-02	0.00E+00	-1.43E-02	1.80E-01	4.72E-03	3.66E+01	4.43E-01	7.60E+03	0.00E+00
7	3.00E-05	2.27E-05	2.34E-05	3.35E-02	1.40E-04	1.22E-02	0.00E+00	-1.43E-02	1.79E-01	4.67E-03	3.67E+01	4.42E-01	7.56E+03	0.00E+00
8	2.39E-05	1.80E-05	1.83E-05	3.14E-02	1.23E-04	1.32E-02	0.00E+00	-1.43E-02	1.79E-01	4.63E-03	3.67E+01	4.40E-01	7.53E+03	0.00E+00
9	2.04E-05	1.55E-05	1.57E-05	2.90E-02	1.10E-04	1.67E-02	0.00E+00	-1.43E-02	1.79E-01	4.61E-03	3.68E+01	4.39E-01	7.50E+03	0.00E+00
10	1.79E-05	1.39E-05	1.39E-05	2.66E-02	1.01E-04	9.60E-03	0.00E+00	-1.43E-02	1.79E-01	4.58E-03	3.68E+01	4.39E-01	7.49E+03	0.00E+00
11	1.60E-05	1.25E-05	1.24E-05	2.42E-02	9.36E-05	1.02E-02	0.00E+00	-1.43E-02	1.79E-01	4.54E-03	3.69E+01	4.38E-01	7.47E+03	0.00E+00
12	1.43E-05	1.13E-05	1.12E-05	2.20E-02	8.79E-05	4.63E-03	0.00E+00	-1.43E-02	1.79E-01	4.49E-03	3.69E+01	4.38E-01	7.46E+03	0.00E+00
13	1.28E-05	1.02E-05	1.01E-05	1.99E-02	8.34E-05	4.50E-03	0.00E+00	-1.43E-02	1.79E-01	4.48E-03	3.69E+01	4.37E-01	7.45E+03	0.00E+00
14	1.16E-05	9.18E-06	9.05E-06	1.81E-02	7.97E-05	3.83E-03	0.00E+00	-1.44E-02	1.79E-01	4.46E-03	3.69E+01	4.37E-01	7.44E+03	0.00E+00
15	1.04E-05	8.29E-06	8.16E-06	1.64E-02	7.66E-05	2.18E-03	0.00E+00	-1.44E-02	1.79E-01	4.43E-03	3.69E+01	4.37E-01	7.44E+03	0.00E+00

Bild A.1: Beispiel einer Ausgabe eines Zeitschrittes der *.fla* Datei.

Der Monitoringpunkt wurde in einer Rezirkulationszone auf der Fahrzeugoberfläche zwischen der Heckscheibe und dem Kofferraumdeckel gewählt. Dort wird eine geringe Strömungsaktivität erwartet. Somit können kleine Änderungen der Strömungseigenschaften und die Konvergenz gut beobachtet werden.

- *User defined parameters:* in diesem Menü können benutzerdefinierte Parameter eingegeben werden. Von einem wurde Gebrauch gemacht:
 - *Parameter Key: USER_GRAD_1, Value: 1*, dieser Parameter dient bei schlechter Gitterqualität für eine Verbesserung der Konvergenz. Die 1 bedeutet, dass zwei Gradient-

Berechnungsmethoden in eine vereinheitlicht werden. Setzt man diesen Parameter auf den Wert 1, wird er aktiviert.

Anhang B

Einstellungen des Löfers (*RealCar and Truck*)

Nach der ausführlichen Beschreibung der Einstellungen des AVL Fire Löfers im vorherigen Anhang A Einstellungen des Löfers (*RealCar*) werden in diesem Abschnitt die gleichen Einstellungen nur aufgelistet. Näher wird auf die Änderungen und Unterschiede zwischen den Simulationen aus den Kapiteln 4 Umströmung eines realistischen Fahrzeuges (*RealCar*) und 5 Quasi-stationärer PKW-LKW Überholvorgang (*RealCar and Truck*) eingegangen. Die verwendete Version des *AVL Fire* Löfers bleibt wieder die Version *v2011.1*. Die Nomenklatur aus dem *AVL Fire GUI* wurde wieder übernommen und besteht aus folgenden Funktionen:

- **Run Mode:** der Rechenmodus wird je nach Simulationsverfahren bestimmt,
 - *Steady / Timestep:* die RANS (Reynolds-averaged Navier Stokes) Simulation ist weiterhin stationär, während die URANS (Unsteady Reynolds-averaged Navier Stokes) und PANS (Partially-averaged Navier Stokes) Simulationen stellen ein instationäres Verfahren dar,
 - *Delta_t:* bei den instationären URANS und PANS Simulationen bleibt der Zeitschritt $\Delta t = 0,001s$,
 - *End time:* die Rechenzeit beträgt $t = 10,3s$. Weil sich die Länge der Domänen und die Einlassgeschwindigkeit nicht geändert haben, entspricht die Rechenzeit wieder $20FTT$ (*Flow through Times*),
 - *Second order:* aktiviert bei URANS und PANS Simulationen,
 - *Restart without time information:* benutzt bei einem Erststart der PANS Simulation, wo die Endlösung aus der URANS Simulation als *restart file* benutzt wird,
- **Module activation:** kein zusätzliches Modul wird aktiviert,
- **Boundary conditions:** an bestimmten Zellflächen werden folgende Randbedingungen definiert:
 - *inlet:* bestimmt die Randbedingungen an der Einlassebene:
 - *Inlet/Outlet: Normal Velocity,*
 - *Normal Velocity: $U_\infty = 38,89ms^{-1}$,*
 - *Fixed temperature: yes, Temperature = 293,15K,*
 - *Fixed scalar: yes, Scalar = 0,*
 - *Fixed turbulence: yes, Turbulence kinetic energy = $0,001m^2s^{-2}$,
Turbulence length scale = $0,001m$ und dazu berechnetes
Turbulence diddipation rate = $0,0051961m^2s^{-3}$,*
 - *outlet:* bestimmt die Randbedingungen auf der Auslassebene:
 - *Inlet/Outlet: Static Pressure, Pressure = 100000Pa,* auf der Auslassebene wird Umgebungsdruck vorgegeben. Diese Einstellung wurde nur noch bei einigen RANS und URANS Simulationen der Position $x/L = 0,39$ verwendet,
 - *Inlet/Outlet: Gradient = 0 – all variables,* wegen der künstlichen Druckerhöhung in der Nähe der Auslassebene bei der Randbedingung *Static Pressure* wird für alle Berechnungen in diesem Kapitel die Randbedingung *Gradient = 0 – all variables* benutzt. Durch eine Neumann-Randbedingung wird an der Auslassebene ein Nullgradient aller Variablen definiert,
 - *symmetry:* - *Symmetry,* bei der *IO* Domäne links, rechts und oben,
 - *inlet-BLC:* bei den *BLC (Boundary Layer Control)* Fällen handelt es sich um eine weitere Einlassebene für die folgende Einstellungen gelten:
 - *Inlet/Outlet: Normal Velocity,* das Fluid strömt senkrecht zu der Einlassebene,
 - *Normal Velocity: $u = -2,7ms^{-1}$,* ein negatives Vorzeichen bedeutet Aussaugen des Fluides aus der Domäne,
 - *Fixed turbulence: yes, Turbulence kinetic energy = $0,0001m^2s^{-2}$,
Turbulence length scale = $0,0003286m$, Turbulence diddipation rate = $0,0005m^2s^{-3}$,*
 - *outlet-BLC:* das abgesaugte Fluid wird durch diese Einlassebene zu der Hauptströmung wieder hinzugefügt:
 - *Inlet/Outlet: Velocity,* dadurch werden die Geschwindigkeitskomponenten separat definiert:

- *Velocity u:* $u_x = 2\text{ms}^{-1}$,
- *Velocity v:* $u_y = 0\text{ms}^{-1}$,
- *Velocity w:* $u_z = 2\text{ms}^{-1}$, diese Eingabe definiert Strömung mit einem 45° Eintrittswinkel und einer Geschwindigkeit von $u_j = 2,835\text{ms}^{-1}$,
- *Fixed turbulence: yes, Turbulence kinetic energy* = $0,0001\text{m}^2\text{s}^{-2}$,
Turbulence length scale = $0,0003286\text{m}$, *Turbulence diddipation rate* = $0,0005\text{m}^2\text{s}^{-3}$.
- **Fluid properties:** die physikalischen Eigenschaften der Luft wurden aus der Bibliothek mit vordefinierten Substanzen übernommen. Die Größe der Dichte und der Viskosität wird aus der Temperatur, die auf der Einlassebene eingestellt wurde, automatisch berechnet:
 - *Fluid properties of:* AIR,
 - *Turbulent Prandtl No.:* 0,9 unveränderter, vordefinierter Wert,
- **Initial conditions:** die Initialisierung ist nur bei der anfänglichen RANS Simulation relevant. Die nachfolgenden URANS und PANS Simulationen werden durch das Endergebnis aus der vorherigen Simulation initialisiert. Die RANS Simulation wird aus folgenden Werten initialisiert:
 - *Pressure* = 100000Pa ,
 - *Density* = $1,18858\text{kgm}^{-3}$ (automatisch berechnet, nicht editierbar),
 - *Temperature* = $293,15\text{K}$,
 - *Turbulence kinetic energy* = $0,001\text{m}^2\text{s}^{-2}$, *Turbulence length scale* = $0,001\text{m}$,
Turbulence diddipation rate = $0,0051961\text{m}^2\text{s}^{-3}$,
 - *Velocity u* = 0ms^{-1} ($38,89\text{ms}^{-1}$), *Velocity v* = 0ms^{-1} , *Velocity w* = 0ms^{-1} , das Feld wird bei dem Windkanalgitter mit Nullgeschwindigkeit und bei dem rechteckigen Gitter mit der Einlassgeschwindigkeit initialisiert,
 - *Scalar* = 0,
 - *Initialization mode:* uniform initialization,
- **Additional terms:** weder die Gravitationskraft, noch eine Rotationskraft wird berücksichtigt:
 - *Gravitational body force:*
 - *Body force:* No,
- **Solver control:** der Löser wird durch folgende Einstellungen angepasst:
 - *Discretization:* bei Diskretisierung der Variabler werden folgende Optionen gewählt:
 - *Calculation of boundary values:* *Extrapolate*, besser bei hexagonalen Zellen,
 - *Calculation of derivatives:* *Least Sq. Fit*, die Methode der kleinsten Quadrate (*linear least squares*) ist bei Berechnung eines Gradienten $\nabla\phi$ benutzt,
 - *Variable Limits*, - *Cell quality check*, - *Cell face adjustment – geometry*, - *Realizability Constrains*, - *Decoupled Domains:* No, von allen diesen Einstellungen wurde kein Gebrauch gemacht,
 - *Cell face adjustment – equation:* yes, die Beschränkung der Kreuzdiffusion wurde aktiviert,
 - *Simple:* die SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equations) Methode für die Druckkorrelation wird benutzt,
 - *Differencing scheme:* folgende Diskretisierungsschemata für die Impulsgleichung, Kontinuitätsgleichung und für die k -, ε -, ζ -, f -Gleichungen werden benutzt:
 - *Momentum:* MINMOD Relaxed, Blending factor 1,
 - *Continuity:* AVL SMART Relaxed, Blending factor 1,
 - *Turbulence:* MINMOD Relaxed, Blending factor 1, bei diesem Blendingfaktor werden die ausgewählten Schemata durch das UDS (*upwind differencing scheme*) Schema erster Ordnung Genauigkeit nicht geblendet,
 - *Linear solver:* folgende Iterationsmethoden mit ihren spezifischen Einstellungen werden beim Lösen einzelnen Lineargleichungen verwendet:
 - *Momentum:* GSTB, Min iteration 0, Max iteration 50, Tolerance 0,1,
 - *Continuity:* AMG, Min iteration 0, Max iteration 50, Tolerance 0,01, bei der Kontinuitätsgleichung ist die Multigrid Methode verwendet. Zum Lösen der anderen Gleichungen wird die GSTAB (*gradient stabilized*) Methode gewählt,

- *Turbulence: GSTB, Min iteration 0, Max iteration 50, Tolerance 0,1,*
- **Convergence criteria:** folgende Kriterien für eine Konvergenz wurden gewählt:
 - *Max number of iterations:* eine RANS Simulation besteht aus maximal 80000 Iterationen, bei einer URANS werden maximal 10 Iterationen und bei PANS 15 Iterationen innerhalb eines Zeitschrittes berechnet,
 - *Min number of iterations:* 5,
 - *Normalized residuals:* normierte Residuen werden benutzt,
 - *Pressure:* 10^{-9} ,
 - *Momentum:* 10^{-15} , bei der Impulsgleichung wurde das Konvergenzkriterium absichtlich sehr niedrig gewählt, die Residuen erreichen nie das Konvergenzkriterium. Dadurch wird garantiert, dass immer die maximale Iterationsanzahl berechnet wird, die minimale Iterationsanzahl wird nicht benötigt,
 - *Turb. kin. energy:* 10^{-9} ,
 - *Turb diss. rate:* 10^{-9} .
- **Equation control:** in diesem Angebot werden weitere wichtige Einstellungen des Löser spezifiziert:
 - *Activate equations:* hier wird bestimmt, welche Differentialgleichungen gelöst werden, dazu auch das Turbulenzmodell und die Wandfunktion mit denen die Berechnung durchgeführt wird:
 - *Momentum & Continuity:* *yes*, die Impuls- und die Kontinuitätsgleichung werden gelöst,
 - *Turbulence: k-zeta-f, PANS, k - ε - ζ - f* Turbulenzmodell als RANS und URANS Simulation, PANS (*Partially-averaged Navier Stokes*) ist ein hybrides Turbulenzmodell, das das *k - ε - ζ - f* Turbulenzmodell für den nichtaufgelösten Anteil verwendet,
 - *Energy:* *No*, keine Energiegleichung,
 - *Scalar:* *No*, keine chemischen Reaktionen,
 - *Pressure reference cell:* 41426684 als Beispiel bei dem *IO Gitter RealCar_n_Truck-G1-test6_pos039.flm* und 1072614 bei *RealCar_n_Truck_W039.flm* für die ausgewählte Position $x/L = 0,39$. Auf den statischen Druck in dieser Zelle bezieht sich dann der relative Druck. Sie sollte deswegen in der freien Strömung liegen und so wird sie immer in der Mitte der oberen Hälfte der Einlassebene positioniert,
 - *Two stage pressure correction:* *No*, keine zweistufige Druckkorrelation,
 - *Compressibility:* *Incompressible*, nach der Machzahl $Ma = 0,113 < 0,3$ wird die Strömung als inkompressibel betrachtet,
 - *Wall Treatment: Hybrid Wall Treatment*, als Wandfunktion wird die hybride Wandfunktion (*compound wall treatment*) verwendet, sie blendet zwischen der Integration bis zur Wand und der Standardwandfunktion,
 - *Underrelaxation factors:* in diesem Menü wird festgestellt, wie stark die Variablen in einzelnen Gleichungen zwischen zwei äußeren Interrationen unterrelaxiert werden:
 - *Momentum:* 0,6, Unterrelaxationsfaktor bedeutet, dass 60% aus der neuen Iteration berücksichtigt wird, der Rest der Lösung kommt aus der vorherigen Iteration,
 - *Pressure:* 0,1, wird bei der Druckkorrelation benutzt,
 - *Turb. kin. energy:* 0,4
 - *Turb. diss. rate:* 0,4
 - *Mass source, - Viscosity:* 1, bedeutet keine Unterrelaxation,
- **Output control:** bei der Datenausgabe unterscheidet man zwischen dem *2D result* in einer Textform und dem *3D result* in grafischer Form,
 - *Write 2D result file:* *User defined*, die Ausgabe wird durch eine benutzerdefinierte Tabelle kontrolliert:

Tabelle B.1: Ausgabefrequenz der *2D Results* bei stationären und instationären Simulationen.

RANS				URANS / PANS			
	upto/at	iterations	each iteration		upto/at	time [s]	each [s]
1	upto	80000	100	1	at	0	
				2	upto	10,3	0,005

Mit dieser Frequenz werden folgende Variable in die *.fla*, *.flb*, *.fl2* Dateien ausgeschrieben:

- ☑ *Flow quantities*, beinhalten *Inlet Mass Flow*, *Outlet Mass Flow*, *Total Mass*, *Mean Pressure*,
- ☑ *Turbulence quantities*, beinhalten *Mean Turbulent Kinetic Energy*, *Mean Dissipation Rate*, *Mean Turbulent Time Scale*,
- ☑ *Wall summary*, gibt y^+ , für jede Fläche je nach *Face Selections* aus,
 - *Sel. for 2D output: car_n_wheels*, gesamte Fläche des PKW-Modells,
 - *Sel. for 2D output: car_wo_wheels*, Fahrzeugoberfläche ohne Räder,
 - *Sel. for 2D output: LKW*, Fläche des LKW-Modells,

auf diesen *Face Selections* werden die Kraft- und Momentenbeiwerte durch eine Formel aufgenommen und berechnet. Der Code der beiden Formeln für Berechnung des Kraft- und Momentenbeiwertes wurde in dem Anhang A Einstellungen des Löser (*RealCar*) gezeigt und ausführlich beschrieben. Bei der neuen *Selection LKW* beträgt die Projektionsfläche des LKW-Modells $A = 1,012m^2$. In der Formel des Momentenbeiwertes für das LKW-Modell hat das Zentrum der Rotationsachse folgende Koordinaten: $x = 2,750125$, $y = 1,431975$, $z = -0,143$ und der Radstand beträgt: $l = 1,56m$. Die Formel rechnet die Momente umgekehrt zu der Rechte-Hand-Regel!

- *Write 3D result file*: bei diesem Angebot wird bestimmt, wann und welche Variable ausgeschrieben werden,
 - ☑ *FIRE v8.0 – v2009*: das alte *.fl3* Format der Ausgabe von *3D result file*. Jede Datei wird nicht größer als 1GB,
 - *Output frequency*: zur Bestimmung der Ausgabefrequenz wurde bei URANS und PANS eine Tabelle definiert, bei RANS erfolgt eine Ausgabe immer nach 5000 Iterationen:

Tabelle B.2: Ausgabefrequenz der *3D Results* bei instationären Simulationen.

	upto/at	time [s]	each [s]
1	upto	10,3	0,515
URANS / PANS			

Nur die Strömungsvariable, die dann während der Berechnung auch tatsächlich ausgeschrieben werden, werden hier aufgelistet:

- *Pressure: Yes*,
- *Turbulence kinetic energy and dissipation rate: Yes*,
- *Velocity: Yes*,
- *Vorticity: Yes*: mit dieser Ausgabe ist auch die Ausgabe von Q-Invariant verbunden,
- *New quantity by formula: CFL_Number:-*,
- *New quantity by formula: delta/eta:-*: durch zwei benutzerdefinierte Formeln wird zusätzlich die Ausgabe von der die CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) Zahl $CFL = \frac{u\Delta t}{\Delta x}$

und der *delta/eta* Kennzahl $\frac{\delta}{\eta} = \frac{(\nabla_{vol})^{1/3}}{\left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4}}$ definiert. Beide Variablen wurden im Anhang

A ausführlich beschrieben und ihre Codes vorgestellt,

- *Write restart file*: *Write restart file*, diese Datei wird nicht ausgeschrieben,
- *Write backup file*: *Write backup File*, die *.bc* Datei wird bei RANS, URANS, PANS nach einer Tabelle mit folgender Frequenz ausgegeben:

Tabelle B.3: Ausgabefrequenz der *backup* Dabei bei stationären und instationären Simulationen.

	upto/at	iterations	each iteration		upto/at	time [s]	each [s]
1	upto	80000	1000	1	upto	10,3	0,05
RANS				URANS / PANS			

- *Log file: Monitoring locations: cell no.* = 23090198, als Beispiel wurde die Position $x/L = 0,39$ und das Gitter *RealCar_n_Truck_W039.flm* gewählt. Der Monitoringpunkt befindet sich weiterhin auf der Fahrzeugoberfläche des PKW-Modells zwischen der Heckscheibe und dem Kofferraumdeckel. Der Wert der u -, v -, w -Geschwindigkeit, des Druckes, der turbulenten kinetischen Energie und der Dissipationsrate in diesem Punkt erscheint dann bei jeder Iteration in der *.fla* Datei,
- **User defined parameters**: folgender benutzerdefinierter Parameter wurde definiert:

-
- *Parameter Key: USER_GRAD_1, Value: 1*, Parameter *USER_GRAD_1* zur Verbesserung der Konvergenz bei schlechter Gitterqualität wird durch den Wert 1 aktiviert.

Anhang C

Einstellungen des Löser (RealCar and Truck – Passing)

Dieser Abschnitt beschreibt ausführlich wieder nur die Einstellungen, die sich von dem Anhang A Einstellungen des Löser (RealCar) unterscheiden. Dabei umfasst die Beschreibung sowohl die Fälle *Beginning-* als auch die Fälle *Manoeuvre-* in beiden Varianten *slip* und *move*. Die Fälle, die als *Beginning-* bezeichnet sind, wurden zum Großteil in der Version *AVL Fire v2011.1* gerechnet. Fälle mit bewegendem Gitter bezeichnet als *Manoeuvre-* bzw. *Beginning-move-* wurden mit der Version *AVL Fire v2013.2* simuliert. Die Einzelheiten zu den Einstellungen werden zu der Nomenklatur des *AVL Fire GUI* hinzugefügt:

- **Run Mode:** die Cases *Beginning-slip-* werden sowohl stationär als auch instationär berechnet. Die Gitterbewegung bei den Cases *Manoeuvre-* und *Beginning-move-* kann nur durch eine instationäre Simulation abgebildet werden,
 - *Steady / Timestep:* die stationäre RANS Simulation wird nur bei Simulationen ohne Gitterbewegung verwendet. Die URANS und PANS werden als instationäre Verfahren in beiden Fällen: *Beginning-* und *Manoeuvre-* eingesetzt,
 - *Delta_t:* für die *Beginning-slip-* Cases wird bei den instationären URANS und PANS Simulationen der Zeitschritt $\Delta t = 0,001s$ benutzt. Bei den *Manoeuvre-* bzw. *Beginning-move-* Cases variiert der Zeitschritt zwischen $\Delta t = 0,0005s$, $\Delta t = 0,00025s$ und $\Delta t = 0,0001s$. Fürs Anlaufen der Berechnung werden bei folgenden Berechnungen abgestufte Zeitschritte benutzt, die in der Tabelle C.1 aufgelistet sind:

Tabelle C.1: Größe und Abstufung des Zeitschrittes bei *Beginning-slip- / move-* und *Manoeuvre-slip- / move-* Simulationen.

	upto	time [s]	DeltaT [s]		upto	time [s]	DeltaT [s]		upto	time [s]	DeltaT [s]
1	upto	0.00003	1.E-07	1	upto	0.00001	1.E-07	1	upto	0.00001	1.E-07
2	upto	0.0001	1.E-06	2	upto	0.0001	1.E-06	2	upto	0.0001	1.E-06
3	upto	0.001	1.E-05	3	upto	0.001	1.E-05	3	upto	0.001	1.E-05
4	upto	0.01	0.0001	4	upto	0.05	0.0001	4	upto	0.01 (0.54)	0.0001
5	upto	10	0.0005	5	upto	10	0.00025	(5)	upto	0.54	0.000(25) (5)
<i>Beginning-move- URANS</i>				<i>Beginning-move- PANS</i>				<i>Manoeuvre-slip- / move-</i>			

- *End time:* bei den instationären *Beginning-slip-* Simulationen wird jedes Simulationsverfahren 10 *Flow through Times* berechnet:

$$FTT = \frac{L}{U_\infty} = \frac{50}{55,555} = 0,9s$$
 daraus entsteht eine Rechenzeit von:

$$10FTT = 10 \cdot 0,9s = 9s$$
 Die *Beginning-move-* Simulationen werden nur 1FTT also 0,9s berechnet. Die Simulationszeit des Überholvorgangs beträgt dann immer $t = 0,54s$,
- *Second order:* die zeitliche Diskretisierung zweiter Ordnung Genauigkeit wird nur bei URANS und PANS Simulationen der *Beginning-slip-* Berechnungen aktiviert. Bei Fällen mit Gitterbewegung *Manoeuvre-* und *Beginning-move-* verursacht sie eine Divergenz, deswegen bleibt dort diese Option ausgeschaltet,
- *Restart without time information:* wird vor allem beim Starten der *Manoeuvre-* Berechnungen benutzt, die aus den *Beginning-* Berechnungen initialisiert werden. Diese Option wird ebenso bei einem Erststart der PANS Simulation *Beginning-slip-* verwendet, wo das *restart file* aus der URANS Simulation eingesetzt ist,
- **Module activation:** es wird kein zusätzliches Modul benötigt,
- **Boundary conditions:** dieser Abschnitt definiert die Randbedingungen an diesen Zellflächen:
 - *inlet:* für die Einlassebene gelten folgende Randbedingungen:
 - *Inlet/Outlet: Normal Velocity,*
 - *Normal Velocity:* $U_\infty = 55,555ms^{-1}$ bei den *slip* Fällen,
 - *Normal Velocity:* $U_\infty = 0ms^{-1}$ bei den *move* Fällen,
 - *Fixed temperature: yes, Temperature = 293,15K* diese Angabe ist für die Berechnung der Dichte und Viskosität entscheidend,
 - *Fixed scalar: yes, Scalar = 0,*

- *Fixed turbulence: yes*, *Turbulence kinetic energy* = $0,001m^2s^{-2}$,
Turbulence length scale = $0,001m$ daraus berechnet sich die Dissipation als: $\varepsilon = C_\mu^{3/4} \frac{k^{3/2}}{l} = 0,09^{3/4} \frac{0,001^{3/2}}{0,001} = 0,0051961m^2s^{-3}$
Turbulence diddipastion rate = $0,0051961m^2s^{-3}$,
- *outlet*: für die Auslassebene gilt folgende Randbedingung:
 - *Inlet/Outlet: Gradient* = 0 – *all variables* stellt auf der Auslassebene einen Nullgradient für alle Variablen fest,
- *symmetry*: - *Symmetry*, es werden drei Symmetrieebenen an der Rechendomäne links, rechts und oben definiert,
- *wheels_on_ground_CAR_faces*: bei den schwebenden Rädern wird auf den Stellen des potenziellen Bodenkontakts eine Nullgeschwindigkeit definiert und somit die Berechnung des Auftriebs c_l verbessert:
 - *Wall*: in den Zellflächen wird die Randbedingung Wand mit Nullgeschwindigkeit vordefiniert,
 - *Movement: Velocity* $u = 0ms^{-1}$, $v = 0ms^{-1}$, $w = 0ms^{-1}$,
 - *Thermal: Temperature* = 293,15K,
- *wheels_on_ground_TRUCK_faces*: das gleiche gilt für die potenziellen Kontaktflächen der LKW-Räder:
 - *Wall*: Randbedingung Wand mit Nullgeschwindigkeit,
 - *Movement: Velocity* $u = 0ms^{-1}$, $v = 0ms^{-1}$, $w = 0ms^{-1}$,
 - *Thermal: Temperature* = 293,15K,
- *boden_slip*: bei den *slip* Fällen wird die Entstehung der Grenzschicht auf der Fahrbahn durch diese Randbedingung vermieden:
 - *Wall*: diese Wand-Randbedingung definiert in den Zellflächen der Fahrbahn eine Geschwindigkeit in positiver x -Richtung, die gleich der Anströmgeschwindigkeit ist,
 - *Movement: Velocity* $u = 55,555ms^{-1}$, $v = 0ms^{-1}$, $w = 0ms^{-1}$,
 - *Thermal: Temperature* = 293,15K.
 Dadurch bewegt sich die Fahrbahn mit gleicher Geschwindigkeit wie die Hauptströmung. So werden die Geschwindigkeitsprofile der realen Situation, wo ruhende Luft herrscht und die Fahrbahn durch eine Nullgeschwindigkeit geprägt ist, besser widerspiegelt als bei Verwendung von *Slipwall*, wo $\left(\frac{\partial \bar{u}_1}{\partial x_2}\right)_{slip} \neq 0$ gilt und somit die Geschwindigkeit an der Wand an einen festen Wert nicht gebunden ist.
- *car_n_wheels_BL-rot*: dieses *face selection* beinhaltet die PKW-Oberfläche ohne die rotierenden Teile, die bei drehenden Rädern rotieren:
 - *Wall*: durch die Wand-Randbedingung wird auf der Oberfläche eine vordefinierte Geschwindigkeit eingegeben,
 - *Movement: Velocity* $u = -55,555ms^{-1}$ (bei *slip* Fällen), $u = 55,555ms^{-1}$ (bei *Beginning-move*- Fällen) und $u = 111,11ms^{-1}$ (bei *Manoeuvre-move*- Fällen), $v = 0ms^{-1}$, $w = 0ms^{-1}$,
 - *Thermal: Temperature* = 293,15K,
- *raeder_vorn-rot*: zu diesem *face selection* gehören die vorderen Räder und Bremscheiben, die bei den Fällen, die als *rot* bezeichnet sind, mit einer Winkelgeschwindigkeit rotieren:
 - *Wall*: die Wand-Randbedingung gibt auf der Oberfläche eine Winkelgeschwindigkeit mittels einer Formel vor,
 - *Movement: Velocity* u : *Formula*, v : *Formula*, w : *Formula*.
 Als Beispiel wird die *Velocity u: Formula* eines *Manoeuvre-slip*- Case gezeigt:

```
#define REAL_wheel_radius_in_m 0.134182
#define REAL_car_velocity_in_m_per_s 55.555
#define VEC_wheel_axis {0, -1, 0}
#define SEL_u_v_w_component 0
#define PT_point_on_wheel_axis {(14.99-(55.555*t)), 0, -0.009}

double c[3];
double omega[3];
```

```

$$init
c = PT_point_on_wheel_axis;
omega = VEC_wheel_axis;
omega /= |omega|;
omega *= REAL_car_velocity_in_m_per_s / REAL_wheel_radius_in_m;
//print "_____BC-Formula_____ omega:", omega, "c:", c;

$$formula
double v[3];
c = PT_point_on_wheel_axis;
omega = VEC_wheel_axis;
omega /= |omega|;
omega *= REAL_car_velocity_in_m_per_s / REAL_wheel_radius_in_m;
v = omega ^ (x-c);
return v[SEL u v w component];

```

In dem ersten Teil der Formel *Global Formula Variables* wird der Radradius, die Fahrgeschwindigkeit, die Achsenrichtung, die Geschwindigkeitskomponente und ein Punkt auf der Rotationsachse definiert. Bei den Cases *Manoeuvre-move*- beträgt die Fahrgeschwindigkeit $111,11\text{ms}^{-1}$. Die Orientation der Rotationsachse bestimmt die Rotationsrichtung. Bei der *move* Variante ändert sich ebenso das Vorzeichen. Wegen der PKW-Bewegung muss die x -Komponente des Punktes auf der Rotationsachse bei den *moving* Fällen durch die Variable t (Zeit) berechnet werden. Für die *Manoeuvre-slip*- Fälle berechnet sich die x -Komponente als: $(14,99 - 55,555 \cdot t)$, bei *Manoeuvre-move*- als: $(35,0095 + 111,11 \cdot t)$, die *Beginning-slip*- Fälle bewegen sich nicht, also fällt die Variable weg: $14,99$ und bei *Beginning-move*- wird sie berechnet als: $(-14,99 + 55,555 \cdot t)$. In *Formula Initialization* und *Formula Body* wird die Winkelgeschwindigkeit in jeder Zellfläche berechnet und ausgeschrieben,

- *Thermal: Temperature* = $293,15\text{K}$,
- *raeder_hinten_antriebswellen-rot*: in diesem *face selection* sind die hinteren Räder mit Bremscheiben und Antriebswellen beinhaltet. Bei den *rot* Fällen wird dort wieder die Winkelgeschwindigkeit definiert:
 - *Wall*: die Wand-Randbedingung benutzt ebenso die Eingabe durch die Formeln,
 - *Movement: Velocity u: Formula, Velocity v: Formula, Velocity w: Formula*. Die x -Komponente des Punktes auf der Rotationsachse ändert sich: $14,99 \rightarrow 16,145$ und $35,0095 \rightarrow 38,8545$. Die Rotation der LKW-Räder ist wegen der geometrischen Form des LKWs nicht möglich nachzustellen,
 - *Thermal: Temperature* = $293,15\text{K}$,
- *LKW_BL*: diese *surface selection* beinhaltet die komplette LKW-Oberfläche außer den Zellflächen, die den Bodenkontakt der Räder darstellen. Dadurch wird bei der *move* Variante eine vordefinierte Geschwindigkeit festgestellt:
 - *Wall*: durch die Wand-Randbedingung wird auf der LKW-Oberfläche eine Geschwindigkeit in positiver x -Richtung definiert, die der durch die Gitterbewegung erzeugten Geschwindigkeit entspricht,
 - *Movement: Velocity u* = $55,555\text{ms}^{-1}$, *Velocity v* = 0ms^{-1} , *Velocity w* = 0ms^{-1} ,
 - *Thermal: Temperature* = $293,15\text{K}$.
- **Fluid properties**: bei dem Arbeitsmedium handelt es sich um die Luft. Ihre Eigenschaften wurden aus der AVL-Bibliothek übernommen. Aus der Temperatur auf der Einlassebene wird die Dichte und die Viskosität berechnet:
 - *Fluid properties of: AIR*,
 - *Turbulent Prandtl No.*: $0,9$ Default-Wert,
- **Initial conditions**: bei der *slip* Variante wird nur die erste RANS Simulation aus dem Case *Beginning*- durch diese Initialwerte gestartet. Die nachfolgenden *Beginning-slip*- URANS und PANS Simulationen werden dann immer durch das Endergebnis aus der vorherigen Berechnung initialisiert. Bei der *move* Version wird sowohl die *Beginning-move*- URANS als auch die PANS Simulation aus diesen Initialwerten gestartet. Weil sich das ganze Gitter zu dem Inertialsystem bewegt und in $0,9\text{s}$ 50m hinterlegt, würde die gesamte Simulation, die aus URANS initialisiert wurde, nach PANS am Ende

100m zurücklegen. Aus diesem Grund wird der Case *Beginning-move*- PANS nicht durch den Case *Beginning-move*- URANS initialisiert. Die *Manoeuvre*- Simulationen werden immer aus einer je nach Einstellung (z.B. *rot*) und Version (*slip* / *move*) passenden *Beginning*- Simulation gestartet. Das Strömungsfeld wird aus folgenden Werten, die mit den Einstellungen auf der Einlassebene übereinstimmen, initialisiert:

- *Pressure* = 100000Pa,
- *Density* = 1,18858kgm⁻³ (nicht editierbar),
- *Temperature* = 293,15K,
- *Turbulence kinetic energy* = 0,001m²s⁻², *Turbulence length scale* = 0,001m, *Turbulence diddipation rate* = 0,0051961m²s⁻³,
- *Velocity u* = 55,555ms⁻¹ (bei *Beginning-slip*-), *Velocity u* = 0ms⁻¹ (bei *Beginning-move*-), *Velocity v* = 0ms⁻¹, *Velocity w* = 0ms⁻¹,
- *Scalar* = 0,
- *Initialization mode: uniform initialization*,
- **Additional terms:** in diesem Kapitel wirkt in den Simulationen auf die Strömung keine Gravitations- oder zusätzliche Rotationskraft:
 - *Gravitational body force:*
 - *Body force: No*,
- **Solver control:** es sind folgende Einstellungen des Lösers ausgewählt:
 - *Discretization:* die Diskretisierung der Variablen erfolgt durch folgende Verfahren:
 - *Calculation of boundary values:* *Extrapolate*, der Druck auf der Oberfläche wird durch eine Extrapolation des Zellenwerts berechnet. Bei hexagonalen Zellen ist *Extrapolate* vor *Mirror* bevorzugt,
 - *Calculation of derivatives:* *Least Sq. Fit*, der Gradient $\nabla\phi$ eines Wertes ϕ wird durch die Methode der kleinsten Quadrate (*linear least squares*) berechnet,
 - *Variable Limits*, - *Cell quality check*, - *Cell face adjustment – geometry*, - *Realizability Constrains*, - *Decoupled Domains: No*, alle diese Angebote sind ausgeschaltet geblieben,
 - *Cell face adjustment – equation: yes*, durch die Aktivierung dieses Angebots wird die Kreuzdiffusion beschränkt und darf die normale Diffusion nicht überschreiten,
 - *Simple:* die Druckkorrelation erfolgt durch die SIMPLE (semi-implicit method for pressure-linked equations) Methode,
 - *Differencing scheme:* der konvektive Fluss durch die KV-Flächen wird mittels folgender Diskretisierungsschemata berechnet. Sie unterscheiden sich je nach Anwendung bei der Impulsgleichung, Kontinuitätsgleichung und bei den *k*-, ϵ -, ζ -, *f*-Gleichungen:
 - *Momentum: MINMOD Relaxed, Blending factor 1*,
 - *Continuity: AVL SMART Relaxed, Blending factor 1*,
 - *Turbulence: MINMOD Relaxed, Blending factor 1*, die beiden hier verwendeten TVD Schemata sind Schemata zweiter Ordnung Genauigkeit und durch den Blendingfaktor 1 werden sie durch das UDS Schema erster Ordnung Genauigkeit nicht geblendet,
 - *Linear solver:* die Lineargleichungen der aufgelisteten Variablen werden durch unterschiedliche Iterationsmethoden gelöst:
 - *Momentum: GSTB, Min iteration 0, Max iteration 50, Tolerance 0,1*,
 - *Continuity: AMG, Min iteration 0, Max iteration 50, Tolerance 0,01*,
 - *Turbulence: GSTB, Min iteration 0, Max iteration 50, Tolerance 0,1*, für die Kontinuitätsgleichung wurde die Multigrid Methode verwendet, die restlichen Gleichungen werden durch die GSTAB (*gradient stabilized*) Methode gelöst,
 - *Convergence criteria:* für die Simulationen gelten folgende Konvergenzkriterien:
 - *Max number of iterations:* die einzige *Beginning-slip*- RANS Simulation wird 20000 Iterationen berechnet. Ein Zeitschritt der *Beginning-slip*- URANS Simulationen besteht aus maximal 10 Iterationen und der PANS Simulationen aus 15 Iterationen. Bei der Gitterbewegung sowohl bei *Beginning-move*- als auch bei *Manoeuvre-slip*- / *move*- werden innerhalb eines Zeitschrittes maximal 25 Iterationen berechnet,
 - *Min number of iterations: 5*,

- *Normalized residuals*: es werden normierte Residuen verwendet,
- *Pressure*: 10^{-9} ,
- *Momentum*: 10^{-15} , das Konvergenzkriterium der Impulsgleichung zwingt immer die maximale Iterationsanzahl auszuführen,
- *Turb. kin. energy*: 10^{-9} ,
- *Turb diss. rate*: 10^{-9} .
- **Equation control**: dieses Angebot bietet die Wahl der gelösten Gleichungen und deren Eigenschaften:
 - *Activate equations*: hier werden die relevanten Differentialgleichungen, das Turbulenzmodell, Kompressibilität und die Wandfunktion ausgewählt:
 - *Momentum & Continuity*: *yes*, wählt die Impuls- und die Kontinuitätsgleichung aus,
 - *Turbulence*: *k-zeta-f, PANS*, für das RANS Verfahren wird das $k - \varepsilon - \zeta - f$ Turbulenzmodell verwendet. PANS ist ein hybrides Verfahren, das zwischen RANS und DNS nahtlos umschaltet und für den nichtaufgelösten Teil das $k - \varepsilon - \zeta - f$ Turbulenzmodell benutzt. Weil im *AVL Fire* die zeitliche Mittelung über *Restarts* nur bei PANS implementiert ist, wurde in diesem Kapitel die Mittelung bei dem URANS Verfahren durch die Einstellung von PANS in diesem Menü und durch fixieren des f_k -Parameters: $f_k = 1$ anhand zwei *User functions* durchgeführt. Somit wird das ganze Turbulenzspektrum modelliert und PANS wird zu URANS.
 - *Energy*: *No*, ohne Energiegleichung,
 - *Scalar*: *No*, ohne chemische Reaktionen,
 - *Pressure reference cell*: 61343910 aus dieser Zelle wird der Referenzdruck für den relativen Druck entnommen. Sie liegt in freier Strömung in der Mitte der oberen Hälfte der Einlassebene,
 - *Two stage pressure correction*: *No*, ohne zweistufige Druckkorrelation,
 - *Compressibility*: *Incompressible*, bei den *Beginning*- Fällen treten keine kompressible Effekte auf, die Machzahl ist $Ma = \frac{U}{a} = \frac{55,555}{343} = 0,162 < 0,3$. Bei den *Moving*- Fällen liegt die Machzahl an der Grenze: $Ma = \frac{111,11}{343} = 0,324$. Nichtsdestotrotz wird die Strömung in beiden Fällen als inkompressibel betrachtet,
 - *Wall Treatment*: *Hybrid Wall Treatment*, die hier verwendete hybride Wandfunktion (*compound wall treatment*) verbindet durch eine Blendingfunktion die Integration bis zur Wand mit der Standardwandfunktion,
 - *Underrelaxation factors*: stellen fest, wie die Variablen zwischen zwei äußeren Iterationen unterrelaxiert werden. Bei meisten *Beginning*- Fällen muss das Anlaufen durch eine tabellarische Eingabe stufenartig stark unterrelaxiert werden. Hier werden nur die Endwerte gezeigt:
 - *Momentum*: 0,6 (0,2), die Lösung setzt sich aus 60% der neuen Iteration und aus 40% der vorherigen Iteration zusammen. Der Wert in Klammern wird bei der PANS Simulationen *move* und *slip* mit $\Delta t = 0,0005s$ verwendet,
 - *Pressure*: 0,1 (0,08),
 - *Turb. kin. energy*: 0,4 (0,1),
 - *Turb. diss. rate*: 0,4 (0,1), bei den PANS Simulationen *move* und *slip-0005* wird die Konvergenz nur durch größere Unterrelaxation erreicht,
 - *Mass source, - Viscosity*: 1 keine Unterrelaxation dieser beiden Variablen,
- **Output control**: bestimmt Einzelheiten zu der Textausgabe *2D result* und der grafischen Ausgabe *3D result*:
 - *Write 2D result file*: *User defined*, durch eine benutzerdefinierte Tabelle erfolgt die Ausgabe in bestimmter Zeitfrequenz. Für unterschiedliche Simulationen werden diverse Zeitausgaben definiert:

Tabelle C.2: Ausgabefrequenz der *2D Results* bei *Beginning-slip- / move-* und *Manoeuvre-slip- / move-* Simulationen.

	upto/at	iterations	each iteration			upto/at	time [s]	each [s]
1	upto	20000	100		1	upto	0.00003	2.E-07
					2	upto	0.0001	2.E-06
					3	upto	0.001	2.E-05
					4	upto	0.9	0.0002
	upto/at	time [s]	each [s]	<i>Beginning-slip- RANS / URANS PANS</i>				
1	upto	9.0	0.005			upto/at	time [s]	each [s]
				<i>Beginning-move-</i>				
						upto/at	time [s]	each [s]
1	upto	0.00001	2.E-07		1	upto	0.00001	1.E-07
2	upto	0.0001	2.E-06		2	upto	0.0001	1.E-06
3	upto	0.001	2.E-05		3	upto	0.001	1.E-05
4	upto	0.01	0.0002		4	upto	0.54	0.0001
5	upto	0.54	0.0005	<i>Manoeuvre-slip- move-</i>				
				<i>Manoeuvre-slip-0001</i>				

Nach diesen Frequenzen werden die *.fla*, *.flb*, *.fl2* Dateien mit folgenden Variablen ausgeschrieben:

- Flow quantities*, beinhalten *Inlet Mass Flow*, *Outlet Mass Flow*, *Total Mass*, *Mean Pressure*,
- Turbulence quantities*, beinhalten *Mean Turbulent Kinetic Energy*, *Mean Dissipation Rate*, *Mean Turbulent Time Scale*,
- Wall summary*, gibt für jede *Face Selection* das y^+ aus,
 - *Sel. for 2D output: car_n_wheels*, gesamte PKW-Oberfläche,
 - *Sel. for 2D output: car_wo_wheels*, PKW-Oberfläche ohne Räder,
 - *Sel. for 2D output: LKW*, als die LKW-Oberfläche,

auf oben genannten *face selections* werden mittels zwei Formeln die Kraft- und Momentenbeiwerte berechnet. Die Codes wurden im Anhang A bereits gezeigt und beschrieben. Für die *car selections* beträgt die Fahrzeuggeschwindigkeit $V = 55,555 \text{ m/s}$ bei den *Beginning-* Fällen und $111,11 \text{ m/s}$ bei den *Manoeuvre-* Fällen. Die Projektionsfläche des PKWs ist $A = 0,351066 \text{ m}^2$. Das Moment bezieht sich zum Punkt mit Koordinaten: $x = 14,5675$, $y = 0$, $z = -0,143$, der sich in Radstandmitte, in Spurmitte und auf der Höhe der Fahrbahn befindet. Die x -Komponente $15,5675$ gilt nur für Cases ohne Bewegung *Beginning-slip-*. Bei Cases die sich bewegen wird die x -Komponente mittels der Zeit t berechnet. Für *Manoeuvre-slip-* gilt $(15,5675 - 55,555 \cdot t)$, für *Beginning-move-* $(-15,5675 + 55,555 \cdot t)$ und für *Manoeuvre-move-* $(34,432 + 111,11 \cdot t)$. Der Radstand für die Normierung der Momentenbeiwerte macht $l = 1,155 \text{ m}$.

Bei der *LKW selection* beträgt die Fahrzeuggeschwindigkeit immer $V = 55,555 \text{ m/s}$, die Projektionsfläche ist $A = 1,012 \text{ m}^2$ und der Radstand $l = 1,56 \text{ m}$. Das Moment wird bei der *slip* Variante, wo sich die Position des LKWs nicht ändert, zum Punkt $x = 0,8875625$, $y = 1,431975$, $z = -0,143$ berechnet. Bei den Cases *Beginning-move-* wird die x -Komponente als $(-0,8875625 + 55,555 \cdot t)$ und bei *Manoeuvre-move-* als $(49,1119375 + 55,555 \cdot t)$ berechnet.

Zu beachten ist, dass die Momente durch diese Formel umgekehrt zu der Rechte-Hand-Regel berechnet werden!

- *Write 3D result file*: in diesem Kapitel wird das normale Format vor dem alten *.fl3* Format bevorzugt. Als nächstes wird die Frequenz und die Variablen für die Ausgabe bestimmt:
 - *FIRE*: diese normale Ausgabe von *3D result file* befindet sich im Verzeichnis von *3D_Results* und ist auf mehrere Unterverzeichnisse Namen *DOM_XXX* geteilt, wo sich dann die Ausgabezeiten von bestimmter Domäne befinden. Dadurch kann diese Nomenklatur größere Datensätze als das alte *.fl3* Format verarbeiten,
 - *Output frequency*: bei der *Beginning-slip-* RANS Simulation erfolgt die Ausgabe mit einer Frequenz von 5000 Iterationen, die instationären *Beginning-slip-* Simulationen haben eine Ausgabe pro *FTT*. Bei den *Beginning-move-* Fällen erfolgt die Ausgabe am Ende der Berechnung. Bei den *Manoeuvre-slip-* Fällen findet eine Ausgabe jede 0,02s statt, zusätzlich stellen die Ausgaben zum bestimmten Zeitpunkt zwischen 3 – 10 die acht diskreten x/L Positionen vor:

Tabelle C.3: Ausgabefrequenz der 3D Results bei Beginning-slip- / move- und Manoeuvre-slip- / move- Simulationen.

	upto/at	iterations	each iteration		upto/at	time [s]	each [s]		upto/at	time [s]	each [s]
1	upto	20000	5000	1	upto	0.9	0.9	1	upto	0.54	0.02
								2	at	0.01	
								3	at	0.198	
								4	at	0.216	
								5	at	0.234	
								6	at	0.252	
								7	at	0.270	
								8	at	0.2875	
								9	at	0.3045	
								10	at	0.3225	
<i>Beginning-slip- RANS / URANS PANS</i>				<i>Beginning-move-</i>				<i>Manoeuvre-slip- move-</i>			

Als nächstes werden die Strömungsvariablen erwähnt, die während der Berechnung ausgeschrieben werden:

- *Pressure: Yes,*
- *Turbulence kinetic energy and dissipation rate : Yes,*
- *Velocity: Yes,*
- *Vorticity: Yes:* mit drin ist auch Q-Invariant enthalten,
- *New quantity by formula: CFL_Number:-:* die CFL (Courant-Friedrichs-Lewy) Zahl: $CFL = \frac{u\Delta t}{\Delta x}$ wird durch eine benutzerdefinierte Formel eingegeben. Der augenblickliche Wert wird mit dem gleichen Code wie im Anhang A berechnet,
- *New quantity by formula: Ave-CFL_Number:-:* die gemittelte CFL Zahl wird in diesem Kapitel mittels *Global formula* berechnet. Die hier gezeigte Formel aus dem *3D result* holt sich die *g_sum_CFL* Variable aus der *Global formula* und schreib sie bei der Ausgabe aus:

```

$$init

$$formula
if(index < g_dim){
    return g_sum_CFL[index];
}else{
    return 0;
}

```

- *New quantity by formula: delta/eta:-:* der augenblickliche Wert der *delta/eta* Kennzahl $\frac{\delta}{\eta} = \frac{(\nabla vol)^{1/3}}{\left(\frac{v^3}{\varepsilon}\right)^{1/4}}$ beruft sich wieder an die Formel aus dem Anhang A,
- *New quantity by formula: Ave-delta/eta:-:* die Mittelung der *delta/eta* Kennzahl erfolgt wie bei der gemittelten CFL-Zahl durch die *Global formula*. Durch die Formel im *3D result* wird wieder nur die Variable *g_sum_DELTA_ETA* bei einer Ausgabe ausgeschrieben,

```

$$init

$$formula
if(index < g_dim){
    return g_sum_DELTA_ETA[index];
}else{
    return 0;
}

```

- *New quantity by formula: Ave-Fratio_PANS:-:* Bei den PANS Simulationen wird durch die *Global formula* auch der f_k -Parameter gemittelt. In dieser Formel wird die Variable *g_sum_FRATIO_PANS* aus der Globalformel abgerufen und ausgeschrieben:

```

$$init

```

```

$$formula
if(index < g_dim){
  return g_sum_ FRATIO_PANS[index];
}else{
  return 0;
}

```

- *Write restart file.* *Write restart file*, eine *.rs* Datei wird nicht ausgegeben,
- *Write backup file.* *Write backup File*, Die *.bc* Datei ist durch die Iteration bzw. Zeitschritt gekennzeichnet und somit einmalig. Bei der *Beginning-slip-* RANS Simulation wird sie jede 1000 Iterationen und bei den *Beginning-slip-* URANS, PANS Simulationen mit einer Frequenz von 0,1s ausgeschrieben. Die Tabellen, die die Ausgabe-Frequenzen und Zeiten für die *Beginning-move-* und *Manoeuvre-slip-*, *move-* Fälle bestimmen, sind zusammen mit den *Beginning-slip-* Fällen in der Tabelle C.4 aufgelistet. Bei den *Manoeuvre-slip-*, *move-* Fällen erfolgt die Ausgabe ebenso zu den Zeitpunkten der acht diskreten x/L Positionen, damit eventuell aus dieser *.bc* Datei eine statische Simulation der entsprechenden Position gestartet werden könnte. Die Simulation *Manoeuvre-slip-* mit $\Delta t = 0,0001s$ hat die Ausgabefrequenz wegen begrenzter Rechenzeit auf dem Hochleistungsrechner feiner abgestuft:

Tabelle C.4: Ausgabefrequenz der *backup* Dabei bei *Beginning-slip-* / *move-* und *Manoeuvre-slip-* / *move-* Simulationen.

	upto/at	iterations	each iteration		upto/at	time [s]	each [s]
1	upto	20000	1000	1	upto	0.00001	5.E-06
				2	upto	0.0001	5.E-05
				3	upto	0.001	0.0005
				4	upto	0.9	0.005
	upto/at	time [s]	each [s]	<i>Beginning-move-</i>			
1	upto	9	0.1	1	upto/at	time [s]	each [s]
<i>Beginning-slip- RANS / URANS PANS</i>				2	upto	0.00001	1.E-06
1	upto	0.00001	5.E-06	3	upto	0.0001	1.E-05
2	upto	0.0001	5.E-05	4	upto	0.001	0.0001
3	upto	0.001	0.0005	5	upto	0.01	0.005
4	upto	0.01	0.005	6	at	0.54	0.0125
5	upto	0.54	0.0125	7	at	0.198	
6	at	0.198		8	at	0.234	
7	at	0.216		9	at	0.252	
8	at	0.234		10	at	0.270	
9	at	0.252		11	at	0.2875	
10	at	0.270		12	at	0.3045	
11	at	0.2875		13	at	0.3225	
12	at	0.3045		<i>Manoeuvre-slip-0001</i>			
13	at	0.3225					
<i>Manoeuvre-slip- move-</i>							

- *Log file: Monitoring locations: cell no. = 55587127*, der Monitorpunkt befindet sich bei allen Simulationen in gleicher Zelle. Sie ist zwischen der Heckscheibe und dem Kofferraumdeckel des PKWs platziert, wo eine geringe Geschwindigkeit herrscht. So lassen sich anhand der *.fla* Datei schon kleine Änderungen der u -, v -, w - Geschwindigkeit, des Druckes, der turbulenten kinetischen Energie und der Dissipationsrate und somit die Konvergenz in diesem Punkt beobachten,
- **Mesh deformation by formula:** das Gitter wird durch eine Formel bewegt. Bei jedem *Time Step* wird durch die Formel die Verschiebung der Knoten (*nodes*) in Bezug auf die Referenzposition, die das *.flm* Anfangsgitter darstellt, berechnet. Erst nach der Verschiebung erfolgt die Berechnung des *Arbitrary connect* für das Interface:
 - *Mesh deformation formula:* *Active: Formula*, durch die Aktivierung der Formel wird ein Teil des Gitters verschoben und der andere Teil deformiert. Neben der Berechnung der Knotenpositionen wird auch ein Gitterqualitätscheck durchgeführt. Der Code wird für die Version *slip* gezeigt:

```

void printMeshQuality()
{
  int nNegVols = 0;
  int nNegPartTets = 0;
  int nNegPartTetsAlt = 0;
}

```

```

int nNegNormals = 0;
double maxAspectRatio = 1.0;
double maxCellSkewness = 0.0;
double maxCellWarpage = 0.0;
int i;
double d;
double alfa;
double pi;
alfa = cos((time_step+1)*pi/5);
pi = 3.141592653589793238462643383279;

if (alfa == 1){
    for(i = 0; i < NCELL-NUMBUF; i++){
        if(CellVolume(i) < 0.0) nNegVols++;
        nNegPartTets += CellNumNegPartTets(i);
        nNegPartTetsAlt += CellNumNegPartTetsAlt(i);
        nNegNormals += CellNumNegNormals(i);
        d = CellAspectRatio(i);
        if(d > maxAspectRatio) maxAspectRatio = d;
        d = CellSkewness(i);
        if(d > maxCellSkewness) maxCellSkewness = d;
        d = CellWarpage(i);
        if(d > maxCellWarpage) maxCellWarpage = d;
    }
    MPI_SUM_I(nNegVols);
    MPI_SUM_I(nNegPartTets);
    MPI_SUM_I(nNegPartTetsAlt);
    MPI_SUM_I(nNegNormals);
    MPI_MAX_D(maxAspectRatio);
    MPI_MAX_D(maxCellSkewness);
    MPI_MAX_D(maxCellWarpage);
    if(IAMPRO < 2){
        print "nNegVols:", nNegVols;
        print "nNegPartTets:", nNegPartTets;
        print "nNegPartTetsAlt:", nNegPartTetsAlt;
        print "nNegNormals:", nNegNormals;
        print "maxAspectRatio:", maxAspectRatio;
        print "maxCellSkewness:", maxCellSkewness;
        print "maxCellWarpage:", maxCellWarpage;
    }
}
if(IAMPRO<2) print "alfa", alfa;
}

$$init
double tol;
int i;
double x[3];
char nodeFlags[1];
double displacements[1][3];
double ds;
int nvert = 0;

if(rezone || nvert != NVERT){
    nvert = NVERT;
    resize(nodeFlags, NVERT);
    resize(displacements, NVERT);
    displacements = 0.0;
}

nodeFlags = 0;
FlagSelectedNodes("CAR_moving", 1, nodeFlags);
FlagSelectedNodes("boundary", 3, nodeFlags);

ds = 0.0 + t * 55.555;
if(IAMPRO<2) print "t, ds:", t, ds;

for(i = 0; i < NVERT; i++){
    if(nodeFlags[i] == 1){
        displacements[i][0] = -ds;
    }
}

tol = rezone ? 0.00000001 : 0.0000001;
ComputeDisplacements(nodeFlags, displacements, "LaplaceArea", "LaplaceVolume", tol, 500);

```

```

for(i = 0; i < NVERT; i++){
    GetVertexCoords(i, x);
    x += displacements[i];
    SetVertexCoords(i, x);
}

printMeshQuality();

$$formula
//

```

Am Anfang erfolgt ein Gitterqualitätscheck, bei dem das Gitter vor allem auf negative Volumina untersucht wird. Weil der Check von Default bei jedem *Time Step* durchgeführt wird, was bei so großem Gitter sehr Rechenaufwändig ist, wurde die Frequenz durch die Variable *alfa* auf jedes zehnten *Time Step* reduziert: $alfa = \cos((time_step + 1) \cdot \pi/5)$. Dabei ist die Variable *time_step* ein einfacher Counter und der Cosinus ermöglicht die Ausführungsfrequenz zu variieren. Immer wenn $alfa == 1$ wird der Qualitätscheck durchgeführt.

In *Formula Initialization* wird das *node selection car_moving* durch die Zuteilung *nodeFlags* = 1 als der bewegte Teil definiert, dessen Gitter sich nicht deformiert. Die unbewegten Gitterteile sind durch das *surface selection boundary* mit *nodeFlags* = 3 definiert. Den restlichen Knoten wird *nodeFlags* = 0 zugeteilt, wodurch das Gitter deformiert wird. Die Verschiebung ist aus der Variable Zeit und Fahrzeuggeschwindigkeit berechnet: $ds = 0.0 + t \cdot 55,555$. Wie schon in dem Abschnitt 6.1 angedeutet wurde, können bei einer großen Verschiebung im Gitter negative Volumina entstehen. Aus diesem Grund wurde das Gitter durch eine separate Simulation in die Ausgangsposition $x/L = -6$ verschoben und bei den Manoeuvre- Cases wird dann nur die tatsächliche Fahrzeugbewegung berechnet. Teil des Codes: $displacements = [i][0] = -ds$ stellt die Bewegung in einer negativen Achsenrichtung fest. Die Gitter-Verschiebung und Deformation wird durch Laplace-Differenzialgleichungen berechnet:

ComputeDisplacements(nodeFlags, displacements, LaplaceArea, LaplaceVolume, tol, 500). Dabei sind von Bedeutung die Toleranz und die Iterationsanzahl. Bei der Definition der Toleranz: $tol = rezone ? 0,00000001 : 0,0000001$ bezieht sich die erste Nummer auf die Toleranz bei jedem Neustart für die Anfangsposition. Die zweite Nummer ist auf die Verschiebungsschritte bei den *Time Steps* bezogen. Eine kleine Toleranz hilft die Entstehung der negativen Volumina zu vermeiden. Der Parameter, der auf die Entstehung der negativen Volumina den größten Einfluss hat, ist die Anzahl der Iterationen, womit die neue Position berechnet wird. Mit steigender Entfernung von der Ausgangsposition variiert die Iterationsanzahl zwischen 100 – 250 – 500 um die negativen Volumina zu verhindern. Die Berechnung der Iterationen von Laplace-Differenzialgleichungen ist bei so großem Gitter rechenintensiver als die Berechnung der Iterationen von Navier-Stokes-Gleichungen innerhalb eines *Time Step*.

Für die Fälle *Beginning-move*- ändert sich die Formel wie folgt:

```

nodeFlags = 0;
FlagSelectedNodes("DOMAIN_moving", 1, nodeFlags);

domain_ds = 0.0 + t * 55.555;
if(IAMPRO<2) print "t, domain_ds:", t, domain_ds;

displacements[i][0] = domain_ds;
ComputeDisplacements(nodeFlags, displacements, "LaplaceArea", "LaplaceVolume", tol, 250);

```

Bei den Fällen wird das ganze Gitter nur bewegt in positiver *x*-Richtung und nicht deformiert. Um das zu erreichen, beinhaltet die *node selection DOMAIN_moving* mit *nodeFlags* = 1 die komplette Rechendomäne und zusätzlich wird ein *boundary selection* mit *nodeFlags* = 3 definiert. Die Verschiebung der kompletten Rechendomäne wird als *domain_ds* bezeichnet und erfolgt durch $displacements = [i][0] = domain_ds$ in einer positiven Achsenrichtung. Für die Berechnung der Laplace-Differenzialgleichungen reichen bei einer Verschiebung ohne Deformation nur 250 Iterationen um die negativen Volumina zu verhindern.

Bei den Fällen *Manoeuvre-move*- bewegt sich die ganze Rechendomäne *DOMAIN_moving* mit der LKW-Geschwindigkeit, zusätzlich dazu bewegt sich das *node selection CAR_moving* mit der PKW-Geschwindigkeit und das Gitter vor und hinter wird deformiert. Im Code müssen zwei Verschiebungen definiert werden:

```
nodeFlags = 0;
FlagSelectedNodes("DOMAIN_moving", 1, nodeFlags);

domain_ds = 0.0 + t * 55.555;
    if(IAMPRO<2) print "t, domain_ds:", t, domain_ds;

for(i = 0; i < NVERT; i++){
    if(nodeFlags[i] == 1){
        displacements[i][0] = domain_ds;
    }
}

nodeFlags = 0;
FlagSelectedNodes("CAR_moving", 2, nodeFlags);
FlagSelectedNodes("boundary", 3, nodeFlags);

car_ds = 0.0 + t * 111.11;
    if(IAMPRO<2) print "t, car_ds:", t, car_ds;

for(i = 0; i < NVERT; i++){
    if(nodeFlags[i] == 2){
        displacements[i][0] = car_ds;
    }
}

ComputeDisplacements(nodeFlags, displacements, "LaplaceArea", "LaplaceVolume", tol, 500);
```

Zusammengefasst bewegt das *DOMAIN_moving* mit *nodeFlags* = 1 die ganze Rechendomäne, das *CAR_moving* mit *nodeFlags* = 2 schiebt die Domäne um den PKW und das *selection boundary* mit *nodeFlags* = 3 definiert die Deformation der vorderen und hinteren Gitterteilen. Die Iterationsanzahl zum Lösen der Laplace-Differenzialgleichungen variiert wieder zwischen 100 – 250 – 500. Die zweifache Gitterbewegung erhöht signifikant den Rechenaufwand,

- **Global formula definitions:** die Globalformel ist den anderen Formeln übergeordnet. Sie besteht aus Teilen: *Global Formula Variables*, *GlobalInit* und *GlobalUpdate*. Die in dem Abschnitt *Global Formula Variables* definierte Variable und Funktionen werden von den anderen Formeln in *AVL Fire GUI* erkannt und übernommen. Auch die Bezeichnung der in *AVL Fire* vordefinierten Variablen unterscheidet sich zu den anderen Formeln. Die Funktionen, die sich im Abschnitt *GlobalInit* befinden, werden nur bei einem Start oder Neustart abgerufen und dienen somit zur Initialisierung der Variablen aus dem *Global Formula Variables*. Im Abschnitt *GlobalUpdate* sind die Funktionen im Vergleich zu *GlobalInit* bei jeder Iteration bzw. bei jedem *Time Step* gerufen. Dadurch werden die im *Global Formula Variables* definierte Variablen kontinuierlich aktualisiert:
 - *New global formula: Formula_1*, durch diese Globalformel wird die CFL Zahl, die *delta/eta* Kennzahl und der f_k -Parameter gemittelt. Diese Art der Mittelung wurde bei den Formeln in vorherigen Kapiteln benutzt, sie funktioniert nicht über einen Neustart:

```
#define AVG_CFL (sqrt((U[i][0]**2)+(U[i][1]**2)+(U[i][2]**2))*DT)/(VOL[i]**0.333)
#define AVG_DELTA_ETA pow(VOL[i],0.3333)/pow(pow(VIM[i],3.0)/ED[i], 0.25)
#define AVG_FRATIO_PANS FCMU[i]

double t_start; // holds time at first call
double t_prev; // holds time at previous call
float g_sum_CFL[0];
float g_sum_DELTA_ETA[0];
float g_sum_FRATIO_PANS[0];
int g_dim = 0; // holds current dimension of sum
double delta_t; // aux
double delta_t_sum; // aux
double time_step;

$$init
//

$$formula
```

```

// resets sum to 0 at start but also at each rezone!
double i;
if(g_dim != NCELL-NUMBUF){ // this will happen at start / restart / rezones
  g_dim = NCELL-NUMBUF;
  resize(g_sum_CFL, g_dim);
  resize(g_sum_DELTA_ETA, g_dim);
  resize(g_sum_FRATIO_PANS, g_dim);
  g_sum_CFL = 0.0;
  g_sum_DELTA_ETA = 0.0;
  g_sum_FRATIO_PANS = 0.0;
  t_start = t;
  t_prev = t;
}
delta_t_sum = t_prev - t_start;
delta_t = t - t_prev;
if (delta_t < 1e-16) delta_t = 1e-16;
t_prev = t;
for(i=0; i<g_dim; i++){
  g_sum_CFL[i] = (g_sum_CFL[i]*delta_t_sum+AVG_CFL*delta_t)/(delta_t_sum+delta_t);
  g_sum_DELTA_ETA[i] =
(g_sum_DELTA_ETA[i]*delta_t_sum+AVG_DELTA_ETA*delta_t)/(delta_t_sum+delta_t);
  g_sum_FRATIO_PANS[i] =
(g_sum_FRATIO_PANS[i]*delta_t_sum+AVG_FRATIO_PANS*delta_t)/(delta_t_sum+delta_t);
}

time_step = ITST;
if(IAMPRO<2) print "TS", ITST;

```

Im Vergleich zu den anderen Formeln ist in der Globalformel die Geschwindigkeit als U , das Zellvolumen VOL und die Dissipationsrate ED vordefiniert. Die Variablen der dynamischen Viskosität VIM und des Zeitschritts DT sind bei allen Formeln gleich genannt. Die Variable $FCMU$ stellt den f_k -Parameter dar und $ITST$ entspricht dem *time step* Counter. Die CFL Zahl, die *delta/eta* Kennzahl und der f_k -Parameter werden in *Global Formula Variables* definiert und in *GlobalUpdate* aktualisiert und dabei gemittelt. Die Berechnung der Mittelung funktioniert wie ein gewogener Mittelwert,

- **User defined parameters:** auch im Kapitel 6 wird von dem benutzerdefinierten Parameter Gebrauch gemacht:
 - *Parameter Key: USER_GRAD_1, Value: 1*, durch den Wert 1 wird der Parameter *USER_GRAD_1* zur Verbesserung der Konvergenz bei schlechter Gitterqualität aktiviert,
- **Job Setup:** dieses Angebot erscheint in *AVL Fire GUI* erst nach betätigen des Startknopfs. Hier lässt sich in dem Abschnitt *Solver Settings* eine benutzerdefinierte Funktion aktivieren und anbinden. Im Fall der URANS Simulationen wird durch die *user function* der f_k -Parameter auf $f_k = 1$ gesetzt und somit wird das PANS- zum URANS-Verfahren:
 - *Solver Settings: Userfunctions: usedef.f, use_difcof.f* durch das Angebot werden zwei *user functions: usedef.f* und *use_difcof.f* angebunden. Alternativ können die *user functions* in einem *Batch Skript* mit dem Befehl: *-uf=/.../usedef.f;/.../use_difcof.f* definiert werden,
 - *usedef.f*: diese Funktion setzt die Variable I_USE_DIFCOF auf $I_USE_DIFCOF = 10$:

```

=====
SUBROUTINE usedef(mat,mph)
=====
C
C   USEDEF IS A SPECIAL PURPOSE ROUTINE TO MODIFY DEFINITION
C   OF SOME VARIABLES AND CONSTANTS
C   ALL USER-SPECIFIED EXPRESSIONS MUST BE WRITTEN IN STANDARD
C   FORTRAN 90 OR IN THE FORTRAN VERSION AVAILABLE ON YOUR MACHINE
C   TO ACTIVATE THE STATEMENTS, PLEASE REMOVE THE 'C' FROM THE
C   FIRST COLUMN
C
C   THIS ROUTINE WILL BE EXECUTED AT PROGRAM START/RESTART
C
C   See the list of variables for the use of this routine
C
C.....contact cfd_support@avl.com
C-----
C-----
      USE comm0
      USE comm1
C-----
C   IMPLICIT NONE

```

```

C-----
C-----
C-----
      I_USE_DIFCOF=10
C-----
      RETURN
      END

```

- *use_difcof*: die nächste Formel wird erst aktiviert wenn die Variable *I_USE_DIFCOF* in der Funktion *usedef.f* einen Wert von: *I_USE_DIFCOF == 10* hat. Ist das der Fall, wird die Variable *fcmu*, die dem *f_k*-Parameter entspricht, auf *one* gesetzt:

```

=====
      SUBROUTINE use_difcof (ieq,kpsc,mat)
=====
C
C      USE_DIFCOF IS A SPECIAL PURPOSE ROUTINE FOR CHANGING
C      THE DIFFUSION COEFFICIENT
C      ALL USER-SPECIFIED EXPRESSIONS MUST BE WRITTEN IN STANDARD
C      FORTRAN 90 OR IN THE FORTRAN VERSION AVAILABLE ON YOUR MACHINE
C      TO ACTIVATE THE STATEMENTS, PLEASE REMOVE THE 'C' FROM THE
C      FIRST COLUMN
C
C      THIS ROUTINE WILL BE EXECUTED AT EACH ITERATION
C
C      See the list of variables for the use of this routine
C
C.....contact cfd_support@avl.com
C-----
C-----
C-----additional comments:
C-----
C-----1. To activate this user function put the command I_USE_DIFCOF=10
C-----into the user function usedef.f
C-----
C-----
C-----
      USE comm0
      USE comm1
      USE prec_mod, ONLY: prec
C-----
      IMPLICIT NONE
C-----
C-----ARGUMENTS
C-----equation number: ieq=imof  momentum
C                      =iphi  scalar
C                      =iphs  enthalpy
C                      =ipte  turbulent kinetic energy
C                      =ipde  turbulent dissipation epsilon
      INTEGER, INTENT(IN) :: ieq  !equation number
      INTEGER, INTENT(IN) :: kpsc ! scalar index
      INTEGER, INTENT(IN) :: mat  !material index
      INTEGER               :: ip
C-----
C-----
C-----
      IF(I_USE_DIFCOF == 10) THEN
C-----
C      PRINT *, 'USE_DIFCOF: Setting fcmo to one.'
      DO ip=nsp(mat),nep(mat)
         fcmu(ip)=one
      END DO
      CALL exchng(fcmu,1,1)
C-----
C-----
C-----
      END IF
C-----
      RETURN
      END
=====

```

Die *user functions* sind in dem Code FORTRAN 90 geschrieben und müssen bei jedem Neustart kompiliert werden. Zum Kompilieren wird ein externer Fortran Compiler benötigt. Zu diesem Zweck wurden die *Intel® C++ Compiler* und der *Intel® Fortran Compiler* in der Version *V11.1*, die bei einer 64bit Linux Plattform von *AVL Fire*

unterstützt werden, installiert, bzw. im *Batch* Skript durch *module load intel/11.1* als Modul geladen.