

# FAT-Schriftenreihe 330

Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und  
Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen



# **Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen**

**Forschungsstelle:  
Universität Stuttgart  
Institut für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen - IVK**

**Sachbearbeiter:** M.Sc. Carlos Peiró Frasquet  
**Bereichsleiter:** Dr.-Ing. Timo Kuthada  
**Lehrstuhl Kraftfahrwesen:** Prof. Dr.-Ing. Andreas Wagner  
Prof. i.R. Dr.-Ing. Jochen Wiedemann

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

# Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b>	<b>III</b>
<b>Abkürzungen</b>	<b>V</b>
<b>Formelzeichen</b>	<b>VII</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>XI</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>XV</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Grundlagen und Stand der Technik</b>	<b>3</b>
2.1 Fluidmechanische Kenngrößen .....	3
2.2 Aerodynamische Beiwerte .....	4
2.3 Statistische Beschreibung von Zufallsprozessen und Signalanalyse.....	5
2.4 Charakterisierung der instationären Strömungssituation .....	8
2.4.1 Turbulente Intensität.....	8
2.4.2 Turbulentes Längenmaß .....	8
2.4.3 Energiespektren .....	11
2.5 Vorgehensweise zur numerischen Strömungssimulation.....	12
2.5.1 Strömungslöser Simulia PowerFLOW®.....	12
2.5.2 Untersuchung zur Aerodynamik anhand numerischer Simulation .....	13
2.6 Stand der Technik.....	18
<b>3 Ermittlung des Luftwiderstandes im Fahrversuch</b>	<b>23</b>
3.1 Fahrversuchsprozedur .....	24
3.2 VECTO Air Drag .....	26
3.2.1 Luftwiderstandskoeffizient in Abhängigkeit des Anströmwinkels .....	27
3.2.2 Luftwiderstandskoeffizient unter frontaler Anströmung.....	31
3.3 Charakterisierung der Strömungssituation im Fahrversuch .....	32
3.3.1 Fahrversuche von IPW Automotive .....	33
3.3.2 Fahrversuche von MAN Truck&Bus .....	36

---

<b>4</b>	<b>Modellierung des natürlichen Windverhaltens</b>	<b>41</b>
4.1	Modellierung anhand der im Fahrversuch aufgenommenen Messdaten.....	41
4.2	Die Mann-Methode.....	42
4.3	Hybrides Verfahren .....	46
4.4	Die „Upstream Turbulence“-Funktion des PowerFLOW® .....	47
<b>5</b>	<b>Erzeugung der Anströmbedingungen</b>	<b>49</b>
5.1	Stationäre Windverhältnisse.....	49
5.2	Instationäre Windverhältnisse .....	51
5.2.1	Charakteristische Messsignale aus dem Fahrversuch .....	51
5.2.2	Die Mann-Methode .....	53
5.2.3	Hybrides Verfahren .....	58
5.2.4	Die „Upstream Turbulence“-Funktion des PowerFLOW®.....	60
<b>6</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>61</b>
6.1	Stationäre Windverhältnisse.....	61
6.2	Instationäre Windverhältnisse .....	64
6.2.1	Luftwiderstandsbeiwerte .....	64
6.2.2	Zeitliche Entwicklung der aerodynamischen Kräfte.....	66
6.2.3	Strömungstopologie und Entstehung des Luftwiderstands .....	71
6.3	Diskussion der Ergebnisse .....	76
<b>7</b>	<b>Schlussfolgerung und Ausblick</b>	<b>79</b>
<b>8</b>	<b>Literatur</b>	<b>82</b>
<b>Anhang</b>		<b>85</b>
A.1	Fluideigenschaften .....	85
A.2	„Upstream Turbulence“-Funktion vom PowerFLOW®.....	85
A.3	Turbulenzgrößen anhand der Mann-Methode.....	86
A.4	Fahrzeugeinfluss .....	87
A.5	Zeitliche Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts.....	87

# Kurzfassung

Die Anforderungen an die Wirtschaftlichkeit und umweltbezogenen Aspekte von Nutzfahrzeugen erfordern eine permanente Steigerung der Effizienz in diesem Fahrzeugsegment. Die Reduktion von Schadstoffemissionen und Kraftstoffverbrauch ist ein zentraler Bestandteil der Forschung und Entwicklung im Bereich der Fahrzeugtechnik. Die Rolle der Nutzfahrzeugaerodynamik gewinnt dabei zunehmend an Bedeutung, was sich auch insbesondere im Hinblick der starken CO<sub>2</sub>-Regularien sowie in der aktuellen europäischen Zertifizierungsprozedur widerspiegelt.

Die Europäische Union legt anhand der Verordnung (EU) 2019/1242 klare Ziele zur Senkung der CO<sub>2</sub>-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen fest. Um diese zu erreichen, hat die EU-Kommission eine Zertifizierungsprozedur ins Leben gerufen, bei der die Deklaration des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes, der durch den Luftwiderstand entsteht, anhand von Fahrversuchen und dem Softwarepaket VECTO Air Drag ermittelt werden muss.

Die aerodynamische Entwicklung von Nutzfahrzeugen erfolgt üblicherweise im Windkanal und mithilfe numerischer Strömungssimulation. Dabei wird klassischerweise der Luftwiderstandsbeiwert unter einer frontalen und turbulenzarmen Anströmung bestimmt. In der Realität ist jedoch ein Nutzfahrzeug einer Vielzahl an Umwelteinflüssen ausgesetzt. Durch den natürlichen Wind, die Topografie des Geländes und die Interaktion anderer Verkehrsteilnehmer erfährt dieses auf der Straße eine instationäre und turbulente Anströmung. Die Vernachlässigung derartiger Anströmeinflüsse in der herkömmlichen Strömungssimulation sorgt für große Diskrepanzen zwischen dem numerisch berechneten und dem im Fahrversuch ermittelten Luftwiderstand. Für eine korrekte Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwerts in der numerischen Strömungssimulation ist es folglich erforderlich, auch diesen unter einer zeitlich und räumlich variierenden Anströmung zu untersuchen.

In der vorliegenden Arbeit werden die aerodynamischen Eigenschaften von Nutzfahrzeugen unter instationären Windverhältnissen sowie der Einfluss der Strömungssituation auf die instationären Kräfte anhand der Analyse der Fahrversuchsergebnisse und numerischer Strömungssimulation untersucht. Dafür wird zunächst die Strömungssituation im Fahrversuch anhand von Fahrversuchen charakterisiert, die auf dem Dekra Prüfgelände in Klettwitz stattfanden und jeweils mit zwei unterschiedlichen Prüffahrzeugen der Firma MAN Truck&Bus durchgeführt wurden. Neben der Charakterisierung der Anströmung und der turbulenten Merkmale, die ein Nutzfahrzeug im Fahrversuch erfährt, wird deren Auswirkung auf den Luftwiderstandsbeiwert mit VECTO Air Drag analysiert.

Zur Abbildung der natürlichen Windverhältnisse in der Strömungssimulation mithilfe einer instationären Anströmung werden vier unterschiedliche Modellierungsansätze untersucht. Die resultierenden implementierten Anströmverfahren unterscheiden sich hinsichtlich der Modellierung der vorgegebenen Anströmtopologie.

Als Untersuchungsobjekt dient zur Konsistenz mit den vorherigen Arbeiten des Arbeitskreises 9 der FAT eine Sattelzugkonfiguration, welche im Rahmen vergangener Untersuchungen als Referenz gewählt wurde. Diese besteht aus einer Zugmaschine Modell TGA 18.480 des Herstellers MAN Truck&Bus und einem Krone 3-Achs-Sattelaufleger mit Kofferaufbau des Typs Dry Liner. Als Bezugspunkt erfolgt zunächst eine Betrachtung des Nutzfahrzeugs unter stationären Anströmbedingungen. Dabei werden zur vereinfachten Darstellung der Windverhältnisse sowohl Frontal- als auch Schräganströmungen berücksichtigt. Anschließend erfolgt die Untersuchung des Nutzfahrzeugs unter instationären Anströmbedingungen zur Abbildung der zeitabhängigen Windverhältnisse. Dafür werden zwei unterschiedliche Strömungssituationen aus den Fahrversuchen mit den jeweiligen entwickelten Anströmverfahren abgebildet. Im Fokus dieser Untersuchungen stand neben der Studie der Auswirkung auf den Gesamtluftwiderstandsbeiwert und dem Vergleich mit dem Fahrversuch auch die Analyse der zeitlichen Entwicklung des Luftwiderstands und dessen Entstehungsmechanismen. Während eine ideale Frontalanströmung mit herkömmlichen Anströmverfahren eine Abweichung zum Fahrversuchsergebnis von ca. 15,4 % darstellt, beträgt diese unter der Abbildung der instationären Windverhältnisse in der Strömungssimulation 8,5 % bis 4,1 %. Es konnte gezeigt werden, dass die Anströmverfahren eine zufriedenstellende Übereinstimmung der Abbildungen der unterschiedlichen Strömungssituationen aufweisen. Hierzu wurden die numerisch gewonnenen Ergebnisse den in den Fahrversuchen ermittelten Beiwerten gegenübergestellt. Dabei zeigt die Streubreite der numerischen Untersuchungen ein vergleichbares Verhalten zu der Streuung der Fahrversuchsergebnisse.

# Abkürzungen

NSG	Navier-Stokes-Gleichungen
LBM	Lattice-Boltzmann-Methode
FAT	Forschungsvereinigung Automobiltechnik
CFD	Computational Fluid Dynamics
SAE	Society of Automotive Engineers
VR	Variable Resolution
MM	Mann-Methode
UT	Upstream-Turbulence (PowerFLOW®)
KMB	Hybrides Verfahren
EU	Europäische Union
DGPS	Differential Global Positioning System





## Formelzeichen

$A_{ij}$	$m^{5/2}/s$	„Wurzel“ der Fourier-Koeffizienten
$A_x$	$m^2$	Projizierte Fahrzeugstirnfläche
$c_p$	-	Statischer Druckbeiwert
$c_W$	-	Luftwiderstandsbeiwert
$C_{ij}$	$m/s$	Fourier-Koeffizienten
$C_{xx}$	-	Autokovarianzfunktion
$C_1, C_2$	-	„Konstanten“ des spektralen Tensors
$f$	-	Wahrscheinlichkeitsfunktion
$f_{Einlass}$	Hz	Frequenz am Einlass
$f_i$	Hz	Diskreter Frequenzwert
$f_i^{eq}$	-	Gleichgewichtsverteilung
$f_{Karman}$	Hz	Frequenz der von-Kármán Spektren
$f_s$	Hz	Abtastfrequenz
$F$	N	Externe Kräfte
$F_W$	N	Luftwiderstandskraft
$G_{xx}$	$m^2/s$	Autoleistungsdichtespektrum in Koordinatenrichtung
$I_x, I_y, I_z$	%	Turbulente Intensität in Koordinatenrichtungen

---

$k_i$	1/m	Wellenzahlvektoren in Koordinatenrichtungen
$K1$	-	Courant-Zahl
$l_{char}$	m	Charakteristische Länge
$L_{D,i}$	m	Länge der Box in Koordinatenrichtungen
$L_i$	m	Turbulentes Längenmaß in den drei Koordinatenrichtungen
$L_{Mann}$	m	Turbulente Länge der Mannmethode
$m_i$	-	Vektor zur Aufspannung der Wellenzahlvektoren entlang der Koordinatenrichtungen
$n_j$	-	Gauß'sche Normalverteilung
$N$	-	Anzahl diskreter Werte
$N_i$	-	Anzahl Punkte in Koordinatenrichtungen
$p$	N/m <sup>2</sup>	Statischer Druck
$p_\infty$	N/m <sup>2</sup>	Statischer Druck der ungestörten Anströmung
$q_\infty$	N/m <sup>2</sup>	Dynamischer Druck der ungestörten Anströmung
$Re$	-	Reynoldszahl
$S_{xx}, S_{yy,zz}$	m <sup>2</sup> /s	von-Kármán Spektren in Koordinatenrichtungen
$t_i$	s	Diskreter Zeitwert
$t_{sim}$	s	Simulationszeit der Strömungsberechnung
$T_i$	s	Charakteristisches Zeitmaß
$T_f$	s	Zeitliche Länge des Signals



$u, v, w$	m/s	Geschwindigkeitskomponenten
$u', v', w'$	m/s	Geschwindigkeitsfluktuation in Koordinatenrichtungen
$U$	m/s	Fouriertransformierte eines Geschwindigkeitssignals
$v_{Fzg}$	m/s	Fahrzeuggeschwindigkeit
$\bar{v}_{res}$	m/s	Resultierende Strömungsgeschwindigkeit
$\bar{v}_{res,x}, \bar{v}_{res,y}$	m/s	Komponenten resultierender Strömungsgeschwindigkeit
$v_{Wind}$	m/s	Windgeschwindigkeit
$v_x$	m/s	Komponente der Windgeschwindigkeit
$v_y$	m/s	Komponente der Windgeschwindigkeit
$v_\infty$	m/s	Anströmgeschwindigkeit
$V$	m <sup>3</sup>	Volumen der simulierten Box
$x, y, z$		Koordinatenrichtungen
$\alpha \varepsilon^{\frac{2}{3}}$	m <sup>4/3</sup> /s <sup>2</sup>	Dissipation der turbulenten kinetischen Energie
$\beta$	°	Anströmwinkel
$\beta_{Mann}$	-	Dimensionslose Zeit
$\Gamma$	-	Parameter zur Kontrolle der Anisotropie
$\zeta_1, \zeta_2$	-	„Konstanten“ des spektralen Tensors
$\nu$	m <sup>2</sup> /s	Kinematische Viskosität
$\xi$	m/s	Makroskopische Geschwindigkeit

---

$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte von Luft
$\rho_{xx}$	-	Autokorrelationsfunktion
$\sigma$		Standardabweichung
$\sigma^2$		Varianz
$\tau$	s	Zeitverschiebung
$\tau_{LBM}$	s	Relaxationszeit
$\tau_{Wirbel}$	s	Wirbellebensdauer
$\alpha$	°	Windrichtung
$\Phi_{ij}$	m <sup>5</sup> /s <sup>2</sup>	Spektraler Tensor
$\Omega$		Kollisions-Operator

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 2.1</b>	Anströmsituation auf der Straße.....	4
<b>Abbildung 2.2</b>	Charakterisierung turbulenter Anströmsituation bei Straßenmessungen [6].....	10
<b>Abbildung 2.3</b>	Entwicklung der turbulenten Längen und Intensitäten über der Höhe [14].....	11
<b>Abbildung 2.4</b>	Rechengebiet und globale Verfeinerungsregionen um das Nutzfahrzeug bei stationärer (links) und instationärer (rechts) Anströmung.....	14
<b>Abbildung 2.5</b>	Lokale Verfeinerungsregion am Nutzfahrzeug .....	15
<b>Abbildung 2.6</b>	Simulationsprozess .....	18
<b>Abbildung 2.7</b>	Normierter Luftwiderstandsbeiwert: Vergleich zwischen Fahrversuch und CFD unterschiedlicher Fahrzeugvarianten [2] .....	20
<b>Abbildung 3.1</b>	Aufbau und Arbeitsablauf vom VECTO [26] .....	23
<b>Abbildung 3.2</b>	Chronologischer Ablauf der CST-Fahrversuchsprozedur [28] .....	25
<b>Abbildung 3.3</b>	Prüfgelände für den CST-Fahrversuch am Beispiel einer Oval- Teststrecke.....	25
<b>Abbildung 3.4</b>	Versuchsfahrzeug und Messausrüstung [2] .....	26
<b>Abbildung 3.5</b>	Exemplarische Darstellung der Fahrwiderstände über der quadrierten Luftgeschwindigkeit und derer linearen Regression .....	28
<b>Abbildung 3.6</b>	Skizze zur Darstellung der Korrektur des Fahrzeugeinflusses an einem gemessenen $v_{air}$ , $a_r$ -Signal .....	29
<b>Abbildung 3.7</b>	Korrektur der Seitenwindempfindlichkeit unterschiedlicher Fahrzeugtypen .....	32
<b>Abbildung 3.8</b>	Versuchsfahrzeug MAN-TGA [2] .....	33
<b>Abbildung 3.9</b>	Windsituation: Entwicklung der Windstärke $v_{Wind}$ über der Windrichtung $\alpha$ für die gefahrenen Strecke im Fahrversuch.....	34
<b>Abbildung 3.10</b>	Anströmsituation: Anströmwinkel im gesamten Fahrversuch T2 (links). Energiespektrum der $v_{Res}$ , $y$ auf einer Sektion (rechts) .....	34
<b>Abbildung 3.11</b>	Charakterisierung der turbulenten Anströmsituation im Fahrversuch (in Anlehnung an [6]) .....	36
<b>Abbildung 3.12</b>	Versuchsfahrzeug MAN-TGX.....	37

<b>Abbildung 3.13</b>	Anströmsituation: Mittelwert und Standardabweichung des Anström winkels $\beta$ unterschiedlicher Fahrversuche .....	37
<b>Abbildung 3.14</b>	Gemittelte turbulente Größen aus den Fahrversuchen .....	38
<b>Abbildung 3.15</b>	Charakterisierung der turbulenten Anströmsituation im Fahrversuch .....	38
<b>Abbildung 3.16</b>	Turbulente Intensität und Längenmaß der longitudinalen Komponente der Anströmung über der Höhe nach [13, 14] und Streubreite des TGX-Fahrversuchs .....	40
<b>Abbildung 3.17</b>	Turbulente Intensität und Längenmaß der Querkomponente der Anströmung über der Höhe nach [13, 14] und Streubreite des TGX-Fahrversuchs .....	40
<b>Abbildung 4.1</b>	Größe und Auflösung der berechneten Domain der Mann-Methode [32] .....	43
<b>Abbildung 5.1</b>	Randbedingungen unter einer stationären Schräganströmung .....	50
<b>Abbildung 5.2</b>	Skizze der Randbedingung einer instationären Anströmung über ein aus dem Fahrversuch erfasstes Messsignal .....	52
<b>Abbildung 5.3</b>	Zeitliche Entwicklung der Geschwindigkeitskomponenten zur Abbildung der Strömungssituation Fahrversuch T2 .....	52
<b>Abbildung 5.4</b>	Zeitliche Entwicklung der Geschwindigkeitskomponenten zur Abbildung der Strömungssituation Fahrversuch T3 .....	52
<b>Abbildung 5.5</b>	Parameterstudie für Diskretisierungsstrategien für die Mann-Methode .....	54
<b>Abbildung 5.6</b>	Längenskala und turbulente Intensität der longitudinalen (links) und lateralen (rechts) Anströmkomponenten zur Abbildung der Strömungssituation Fahrversuch T2 .....	56
<b>Abbildung 5.7</b>	Autoleistungsdichtespektrum der lateralen Anströmkomponente in einem beliebigen Punkt der Diskretisierung .....	56
<b>Abbildung 5.8</b>	Skizze der Randbedingung anhand der Mann-Methode .....	57
<b>Abbildung 5.9</b>	Skizze der Randbedingung anhand des hybriden Verfahrens .....	58
<b>Abbildung 5.10</b>	Hybrides Verfahren: Charakteristisches Messsignal zur Abbildung der Strömungssituation Fahrversuch T2 (oben) und entsprechende zeitliche Entwicklung der Fluktuationen für einen beliebigen Punkt (unten) .....	59
<b>Abbildung 6.1</b>	Stationäre Schräganströmung: Normierte Luftwiderstandsbeiwerte .....	62
<b>Abbildung 6.2</b>	Stationäre Schräganströmung: Luftwiderstandsbeiwert über der Längsachse .....	63
<b>Abbildung 6.3</b>	Instationäre Anströmung: Normierte Luftwiderstandsbeiwerte .....	64

<b>Abbildung 6.4</b>	Charakteristisches Messsignal inst_T2: Übertragungsverhalten zwischen vorgegebener Anströmung ( $V_{Res}$ ) und der Geschwindigkeit am virtuellen Anemometer ( $V_{Anemometer}$ ) .....	67
<b>Abbildung 6.5</b>	Charakteristisches Messsignal inst_T2: Zeitliche Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts und der Geschwindigkeit am virtuellen Anemometer .....	68
<b>Abbildung 6.6</b>	Mann-Methode MM_T2: Zeitliche Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts und der Geschwindigkeit am virtuellen Anemometer .....	69
<b>Abbildung 6.7</b>	Hybrides Verfahren KMB_T2: Zeitliche Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts und Geschwindigkeit am virtuellen Anemometer.....	70
<b>Abbildung 6.8</b>	Luftwiderstandsbeiwert über der Längsachse: Instationäre Anströmung anhand des charakteristischen Messsignals.....	72
<b>Abbildung 6.9</b>	Oberflächendrücke und Isofläche $c_{p,total}=0$ am Fahrzeugheck: Stationäre Frontanströmung (oben) und instationäre Anströmung anhand des charakteristischen Messsignals inst_T3 (unten) .....	72
<b>Abbildung 6.10</b>	Luftwiderstandsbeiwert über der Längsachse: Instationäre Anströmung anhand der Mann-Methode.....	74
<b>Abbildung 6.11</b>	Oberflächendrücke an der Kabinenstirnfläche und am Fahrzeugheck: Unter einer Frontanströmung (oben) und bei instationärer Anströmung anhand der Mann-Methode (unten).....	74
<b>Abbildung 6.12</b>	Luftwiderstandsbeiwert über der Längsachse: Instationäre Anströmung anhand Ansätze zur Abbildung der Strömungssituation Fahrversuchstag 2 (links) und Fahrversuchstag 3 (rechts).....	75
<b>Abbildung A.1</b>	Oberfläche der „Upstream Turbulence“-Funktion [34] .....	85
<b>Abbildung A.2</b>	Längenskala und turbulente Intensität der longitudinalen (links) und lateralen (rechts) Anströmkomponenten zur Abbildung der Strömungssituation Fahrversuch T3.....	86
<b>Abbildung A.3</b>	Charakteristisches Messsignal inst_T3: Übertragungsverhalten zwischen vorgegebener Anströmung ( $V_{Res}$ ) und der Geschwindigkeit am virtuellen Anemometer ( $V_{Anemometer}$ ) .....	87
<b>Abbildung A.4</b>	Charakteristisches Messsignal inst_T3: Zeitliche Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts und Geschwindigkeit am virtuellen Anemometer .....	87
<b>Abbildung A.5</b>	Mann-Methode MM_T3: Zeitliche Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts und Geschwindigkeit am virtuellen Anemometer.....	88

---

<b>Abbildung A.6</b>	Hybrides Verfahren KMB_T3: Zeitliche Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts und Geschwindigkeit am virtuellen Anemometer .....	88
<b>Abbildung A.7</b>	Upstream Turbulence UT_T2: Zeitliche Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts und Geschwindigkeit am virtuellen Anemometer .....	89
<b>Abbildung A.8</b>	Upstream Turbulence UT_T3: Zeitliche Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts und Geschwindigkeit am virtuellen Anemometer .....	89



# Tabellenverzeichnis

Tabelle 2.1	Verfeinerungsregionen und Voxelgröße .....	15
Tabelle 3.1	Charakterisierung des Anströmwinkels $\beta$ für den gesamten Fahrversuch .....	35
Tabelle 3.2	Gemittelte turbulente Größen aus dem Fahrversuch .....	35
Tabelle 5.1	Stationäre Anströmrandbedingungen .....	50
Tabelle 6.1	Prozentuale Abweichung des Luftwiderstands zum Fahrversuchsergebnis .....	76
Tabelle A.1	Fluideigenschaften und initiale Bedingungen .....	85



# 1 Einleitung

Die Rentabilität und die Wirtschaftlichkeit stehen bei Nutzfahrzeugen von jeher im Vordergrund. Dieser Fokus erfordert es, alle Möglichkeiten zur Minimierung des Kraftstoffverbrauchs auszuschöpfen. Neben den wirtschaftlichen Aspekten spielen die umweltbezogenen Gesichtspunkte eine ebenso wichtige Rolle. Sowohl der Verbrauch als auch die Schadstoffemissionen sinken durch die Verbesserung der aerodynamischen Merkmale erheblich, weshalb diese insbesondere im Hinblick auf die CO<sub>2</sub>-Regularien zusätzlich an Bedeutung gewinnen.

Um die Ziele des Übereinkommens von Paris zu erreichen, beziehungsweise den Anstieg der globalen Durchschnittstemperatur deutlich unter 2 °C über dem vorindustriellen Niveau zu halten sowie ihn auf 1,5 °C über dem vorindustriellen Niveau zu begrenzen, bedarf es der Reduktion der Emissionen von Gasen in allen Bereichen, die den Klimawandel begünstigen. Die CO<sub>2</sub>-Emissionen von schweren Nutzfahrzeugen, wie LKWs und Bussen, machen 6 % der CO<sub>2</sub>-Gesamtemissionen und 26 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen des Straßenverkehrs in der Europäischen Union aus. Aus diesem Grund hat es sich die Europäische Union im Nutzfahrzeugsektor zur Aufgabe gemacht, die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu senken. Dafür hat die EU-Kommission eine Zertifizierungsprozedur ins Leben gerufen, die die einzelnen Anteile betrachtet und daraus die CO<sub>2</sub>-Emissionen des gesamten Fahrzeugs bestimmt [1]. Dabei wird zur Deklaration des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes aufgrund der Aerodynamik des Nutzfahrzeugs der Luftwiderstand anhand von Fahrversuchen und dem Softwarepaket VECTO Air Drag ermittelt. Dies stellt angesichts der technischen Komplexität der zu Grunde liegenden Versuchsprozedur und der Vielfalt an Fahrzeugkonfigurationen eine ressourcenintensive Herausforderung dar.

Vor diesem Hintergrund und mit der Unterstützung europäischer Initiativen, wie dem Semi-Trailer Whitebook des europäischen Verbands der Anhänger- und Aufbautenindustrie (CLCCR), fördern die Zugmaschinen- und Anhängerhersteller die alternative Anwendung von numerischen Simulationen zur Ermittlung des Luftwiderstandsbeiwerts. Dies ist allerdings nur unter der Annahme, dass die Abweichungen bei der Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwertes zwischen Fahrversuch und Simulation geringstmöglich sind, realisierbar.

Die Untersuchungen, die im Rahmen des letzten Projekts des Arbeitskreises 9 der FAT durchgeführt wurden, zeigten unter anderem wie sich die im Fahrversuch gemessenen absoluten Luftwiderstandsbeiwerte deutlich von den numerisch berechneten unterscheiden. Dabei wiesen beide Verfahren, Fahrversuch und

numerische Simulation, eine vergleichbare Prognosegüte bei der Bewertung der Luftwiderstandsdifferenz für zwei verschiedenen Fahrzeugvarianten auf [2].

Mehrere Einflussfaktoren sind für die Abweichung der numerisch gewonnenen Luftwiderstandsbeiwerte zu den im Fahrversuch ermittelten Beiwerte verantwortlich. Hierbei lassen sich die vereinfachten Anströmbedingungen, die in der herkömmlichen Strömungssimulation verwendet werden, als ein besonders relevanter Einflussfaktor identifizieren.

Üblicherweise orientieren sich die vorgegebenen Anströmbedingungen in der herkömmlichen Strömungssimulation an der turbulenzarmen Anströmung im Windkanal, während im Fahrversuch eine davon abweichende Strömungssituation herrscht. Die Anströmsituation im Fahrversuch unterliegt einer räumlich und zeitlich variierenden Strömungstopologie und das Fahrzeug ist entsprechend einer Vielzahl an Umwelteinflüssen, wie dem natürlichen Wind und der Topografie ausgesetzt. Folglich muss der Luftwiderstandsbeiwert bei realitätsnahen Anströmbedingungen, genauer gesagt unter dem Einfluss der natürlichen Windverhältnisse, in der numerischen Strömungssimulation bestimmt werden.

Im Folgenden werden anhand der aufgenommenen Messsignale der Strömungsgrößen zahlreicher Fahrversuche die Natur der Anströmung im Fahrversuch sowie deren turbulenten Eigenschaften untersucht und charakterisiert. Dazu werden auch die CST-Fahrversuchsprozedur und das Programm VECTO Air Drag zur Bestimmung des Luftwiderstands im Fahrversuch analysiert.

Zur Untersuchung der Aerodynamik des Nutzfahrzeugs unter realitätsnahen Anströmsituationen werden verschiedene Ansätze zur Abbildung instationärer Windverhältnisse implementiert. Besonderes Augenmerk wird dabei den Methoden zur Erzeugung turbulenter Fluktuationen gewidmet. Diese müssen in der Lage sein, sowohl die räumliche als auch die zeitliche Struktur der Turbulenz hinreichend zu modellieren. Die Analyse der durchgeführten numerischen Untersuchungen und deren Vergleich mit den Fahrversuchsergebnissen wird die Größenordnung der zu beobachtenden Strömungsphänomene aufgrund der berücksichtigten natürlichen Windverhältnisse und deren Auswirkung auf die Nutzfahrzeugaerodynamik aufzeigen. Dadurch lassen sich Aussagen über die Prognosegüte und Sensitivität der entwickelten Anströmverfahren formulieren.

## 2 Grundlagen und Stand der Technik

Zunächst werden die für diese Arbeit relevanten Definitionen der Fluidmechanik und Fahrzeugaerodynamik eingeführt. Anschließend werden die Grundlagen zur statistischen Beschreibung von Zufallsprozessen vorgestellt. Darauf aufbauend wird die Strömungssituation auf der Straße anhand verschiedener Turbulenzgrößen charakterisiert, um abschließend den aktuellen Stand der Technik aufzuarbeiten.

### 2.1 Fluidmechanische Kenngrößen

Die Beschreibung der Strömungseigenschaften und deren Vergleichbarkeit werden in der Fahrzeugaerodynamik anhand von fluidmechanischen dimensionslosen Kennzahlen definiert. Dabei dienen die genannten Kennzahlen der Ähnlichkeitstheorie und ermöglichen somit die Betrachtung der Skalierbarkeit von Fahrzeugmodellen.

Die Reynoldszahl  $Re$  ist eine dimensionslose Kenngröße, durch welche sich laminare von turbulenten Strömungen unterscheiden lassen. Sie ist definiert als Verhältnis aus in einer Strömung wirkenden Trägheitskräften zu Zähigkeitskräften.

$$Re = \frac{v_{\infty} \cdot l_{char}}{\nu} \quad (2.1)$$

Dabei stellt  $v_{\infty}$  die Strömungsgeschwindigkeit und  $\nu$  die kinematische Viskosität des strömenden Fluids dar. Als charakteristische Länge  $l_{char}$  wird in der Fahrzeugaerodynamik üblicherweise die Fahrzeuglänge verwendet.

Bei der Umströmung eines Straßenfahrzeugs im Überland- und Fernverkehr, wo höhere Geschwindigkeiten gefahren werden, liegt die Reynoldszahl in der Größenordnung von  $Re \geq 5 \cdot 10^6$ . Das bedeutet, dass Geschwindigkeitsschwankungen in der Strömung nur wenig durch viskose Kräfte gedämpft werden. Ein derartiges Strömungsverhalten wird als turbulent gekennzeichnet.

Die Machzahl  $Ma$  bestimmt die Kompressibilität des Fluids. Diese Kenngröße beschreibt das Verhältnis von Trägheits- zu Kompressionskräften und wird aus dem Quotient von Strömungsgeschwindigkeit  $v_{\infty}$  und Schallgeschwindigkeit  $c$  gebildet.

$$Ma = \frac{v_{\infty}}{c} \quad (2.2)$$

In der Fahrzeugaerodynamik wird üblicherweise die Machzahl einer Strömung den Wert von 0.3 nicht überschreiten. Darüber hinaus kann es davon ausgegangen werden, dass die Kompressibilitätseffekte in der Luft vernachlässigt werden können.

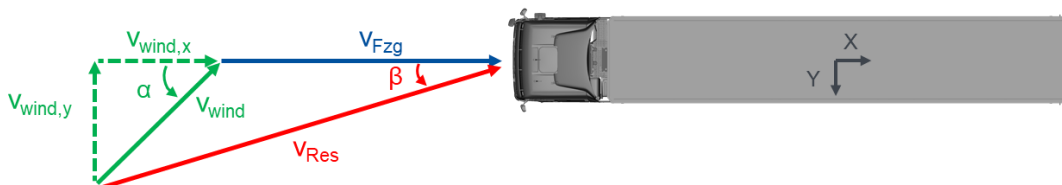
Die Strouhalzahl  $St$  ermöglicht neben den oben vorgestellten Kenngrößen eine Betrachtung zeitabhängiger Ereignisse hinsichtlich der Strömungsphänomene. Nach Gleichung (2.3) wird die dimensionslose Strouhalzahl als das Verhältnis aus der Frequenz  $f$  des betrachteten Ereignisses, der charakteristischen Länge  $l_{char}$  und der Strömungsgeschwindigkeit  $v_{\infty}$  definiert.

$$St = \frac{f \cdot l_{char}}{v_{\infty}} \quad (2.3)$$

Damit lassen sich die in der Fahrzeugaerodynamik auftretenden instationären Strömungsvorgänge wie die Ablösefrequenz von Wirbel charakterisieren.

## 2.2 Aerodynamische Beiwerte

Der natürliche Wind, die Topografie und die Auswirkung des Verkehrs prägen die Topologie der Strömung, mit der das Fahrzeug interagiert. Darüber hinaus weisen solche Strömungsphänomene eine zeitabhängige Natur auf. Zur Erläuterung der Anströmsituation, die ein auf der Straße fahrendes Fahrzeug erfährt, muss diese allerdings als momentane Aufnahme betrachtet werden, wie in **Abbildung 2.1** dargestellt.



**Abbildung 2.1** Anströmsituation auf der Straße

Die auf das Fahrzeug wirkende Geschwindigkeit  $v_{Res}$  ergibt sich entsprechend Gleichung (2.4) durch Vektoraddition der Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{Fzg}$  und der Komponenten der Windgeschwindigkeit  $v_{Wind}$ .

$$v_{Res} = \sqrt{(v_{Fzg} + v_{Wind,x})^2 + v_{Wind,y}^2} \quad (2.4)$$

Die resultierende Anströmrichtung bezüglich der Fahrzeuglängsachse ist durch den Anströmwinkel  $\beta$  gegeben (siehe Gleichung (2.5)). Hierbei ergibt sich die Windrichtung aus dem Windwinkel  $\alpha$ .

$$\beta = \arctan\left(\frac{v_{Wind} \cdot \sin \alpha}{v_{Fzg} + v_{Wind} \cdot \cos \alpha}\right) \quad (2.5)$$

Zur Charakterisierung der aerodynamischen Formgüte von Fahrzeugen werden dimensionslose Beiwerte herangezogen. Der Luftwiderstandsbeiwert ermöglicht eine Vergleichbarkeit der aerodynamischen Formgüte von Fahrzeugen, ohne die explizite Kenntnis der wirkenden Kräfte und Momente. Dieser berechnet sich aus Luftwiderstandskraft  $F_W$ , dynamischem Druck  $q_\infty$  und projizierter Fahrzeugstirnfläche  $A_x$  gemäß Gleichung (2.6).

$$c_W = \frac{F_W}{q_\infty \cdot A_x} \quad (2.6)$$

Der dynamische Druck der ungestörten Anströmung  $q_\infty$  berechnet sich entsprechend Gleichung (2.7) mit der Dichte des strömenden Mediums  $\rho$  und dem Quadrat der Anströmgeschwindigkeit  $v_\infty$ .

$$q_\infty = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_\infty^2 \quad (2.7)$$

Die Drücke können, analog zu dem Luftwiderstandsbeiwert, unabhängig von der Anströmgeschwindigkeit dargestellt werden. Dafür werden die relativ zu einem Referenzdruck gemessenen Drücke mit dem dynamischen Druck der ungestörten Anströmung entdimensioniert.

$$c_p = \frac{p(x, y, z) - p_\infty}{q_\infty} \quad (2.8)$$

Der dimensionslose Druckbeiwert  $c_p$  hat in der ungestörten Anströmung den Wert 0, am Staupunkt hingegen den Wert 1.

## 2.3 Statistische Beschreibung von Zufallsprozessen und Signalanalyse

Die turbulente Strömung, die ein auf der Straße fahrendes Fahrzeug erfährt, ist gekennzeichnet durch ein komplexes dreidimensionales Strömungsfeld mit einer zeitlich und räumlich zufälligen Fluktuation. Die anhand der Messtechnik im Fahrversuch erfassten Strömungsgrößen zeigen, dass sich eine turbulente Strömung

als stochastischer Prozess charakterisieren lässt. Dabei können die aufgenommenen physikalischen Größen in solch einem Strömungsfeld als eine geordnete Grundströmung und eine stochastische Fluktuation, die der ersten überlagert ist, betrachtet werden.

Zur Behandlung von stochastischen Vorgängen, welche in gemessenen Zeitsignalen von Strömungsgrößen inhärent vorhanden sind, sind die Grundlagen der Statistik und der Signalanalyse erforderlich [3, 4]. Im folgenden Kapitel sollen einige relevante, in der Signalanalyse gebräuchliche Definitionen für die in dieser Arbeit angestellten Auswertungen eingeführt werden.

Ein zeitdiskretes Messsignal  $x(t_i)$  kann anhand der Reynoldszerlegung folgendermaßen dargestellt werden:

$$x(t_i) = \bar{x} + x'(t_i) \quad (2.9)$$

Dadurch kann ein beliebiges Messsignal in einen arithmetischen Mittelwert  $\bar{x}$  und einen Fluktuations- oder Schwankungsanteil  $x'(t_i)$  unterteilt werden. Nur unter Betrachtung einer ausreichend langen Messzeit kann das stationäre Verhalten des Messsignals mithilfe des arithmetischen Mittelwerts  $\bar{x}$  erfasst werden. Dieser berechnet sich entsprechend nachfolgender Gleichung (2.10) wobei  $N$  die Anzahl an verfügbaren Messwerten und  $t_i$  den diskreten Zeitpunkt darstellen.

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(t_i) \quad (2.10)$$

Es ist gebräuchlich, zusätzlich zum Mittelwert des Signals noch einen Wert zu berechnen, der Auskunft über die Streuung liefert. Dieser Wert wird als Varianz bezeichnet und wird nach Gleichung (2.11) berechnet. Die Standardabweichung  $\sigma_x$  ist dabei die Quadratwurzel der Varianz.

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (x(t_i) - \bar{x})^2 \quad (2.11)$$

Neben der oben vorgestellten statistischen Beschreibung werden in den folgenden Absätzen die grundlegenden Eigenschaften zeitdiskreter Signale eingeführt.

Eine Möglichkeit zur Analyse von Messsignalen ist die Berechnung des Autoleistungsdichtespektrums. Dieses Spektrum spiegelt die im Signal enthaltene Leistung in Abhängigkeit der Frequenz wider. Am Beispiel eines zeitabhängigen Messsignals kann so ermittelt werden, welche im Signal enthaltenen Frequenzen viel und welche wenig Leistung enthalten. Hierbei kann, gemäß Gleichung (2.12), die Abtastfrequenz



eines Signals als Quotient aus der zeitlichen Länge des Signals  $T_f$  und der Anzahl an diskreten Werten  $N$  in diesem Zeitintervall definiert werden.

$$f_s = \frac{N}{T_f} \quad (2.12)$$

Die Frequenzauflösung  $\Delta f$  ergibt sich daraus entsprechend Gleichung (2.13).

$$\Delta f = \frac{1}{T_f} = \frac{f_s}{N} \quad (2.13)$$

Das Autoleistungsdichtespektrum ist definiert als

$$G_{xx}(f_i) = \frac{2}{\Delta f} (U^*(f_i) \cdot U(f_i)) \quad (2.14)$$

Dabei ist  $U(f_i)$  die Fouriertransformierte des Zeitsignals  $u(t_i)$  und  $U^*(f_i)$  die komplex Konjugierte der Fouriertransformierten. Bei der Berechnung des Autoleistungsdichtespektrums ist die Normierung der Fouriertransformierten  $U(f_i)$  auf  $N/2$  zu beachten.

Weitere Werkzeuge der Signalanalyse sind die Bildung der Autokovarianz- und der Autokorrelationsfunktionen. Diese geben die Korrelation eines Signals mit sich selbst bei einer zeitlichen Verschiebung  $\tau$  an. Die Autokovarianz wird folgendermaßen definiert:

$$C_{xx}(\tau) = \overline{u(t_l) * u(t_l + \tau)} \quad (2.15)$$

Wird die Autokovarianzfunktion anschließend auf ihren Maximalwert normiert, so erhält man die Autokorrelationsfunktion:

$$\rho_{xx}(\tau) = \frac{C_{xx}(\tau)}{C_{xx}(0)} \quad (2.16)$$

wobei  $C_{xx}(0) = \sigma_u^2(0)$  gilt. Korrelieren die Signale gut, was einer kleinen Zeitverschiebung  $\tau$  entspricht, so liefert die Autokorrelationsfunktion einen Wert Nahe 1. Mit zunehmend größerer Zeitverschiebung nähert sich die Funktion der Null an. Das bedeutet, dass die beiden Signale nicht mehr miteinander korrelieren.

Obige Gleichungen gelten sowohl für die Geschwindigkeitskomponente in Längsrichtung  $u$  als auch für die beiden anderen Komponenten.

## 2.4 Charakterisierung der instationären Strömungssituation

Die von einem Fahrzeug auf der Straße erfahrene Strömungssituation wird von zahlreichen unterschiedlichen Faktoren beeinflusst. Dabei spielen nicht nur die Intensität und Richtung des Windes eine bedeutende Rolle, sondern auch deren Interaktion mit der Topografie der befahrenen Straße sowie der Bebauung und des Bewuchs am Straßenrand. Zudem können andere Verkehrsteilnehmer die Anströmung des Fahrzeugs stark ausprägen. Diese Einflüsse erzeugen eine übergeordnete Bandbreite von Wirbelstrukturen unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Ausbreitung, den sogenannten Turbulenzen, sodass die Topologie der Strömung um ein Fahrzeug in Bodennähe als instationär und turbulent gekennzeichnet werden soll.

Zur Beschreibung und Charakterisierung solcher Anströmungen werden in Anlehnung an [5–7] unterschiedliche Turbulenzgrößen verwendet. Diese werden mit Hilfe der in Kapitel 2.3 eingeführten Methoden berechnet und im Folgenden erklärt.

### 2.4.1 Turbulente Intensität

Die turbulente Intensität gibt erste Aussagen über die in einer Strömung enthaltene Energie. Sie ist definiert als Quotient aus Standardabweichung der Geschwindigkeit  $\sigma_i$  und mittlerer Strömungsgeschwindigkeit  $\bar{v}_{Res}$ .

$$I_x = \frac{\sigma_u}{\bar{v}_{Res}}, \quad I_y = \frac{\sigma_v}{\bar{v}_{Res}}, \quad I_z = \frac{\sigma_w}{\bar{v}_{Res}} \quad (2.17)$$

wobei sich die mittlere Strömungsgeschwindigkeit  $v_{Res}$  aus der mittleren Fahrzeuggeschwindigkeit und der mittleren Windgeschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung berechnet (vgl. Abbildung 2.1).

Der so ermittelte Turbulenzgrad herrscht an einem Punkt im Strömungsfeld vor, an dem das Geschwindigkeitssignal aufgezeichnet wurde. In der Regel gilt sie nicht für das gesamte Strömungsfeld. Auf diese Weise lässt sich eine Strömungssituation auf der Straße einerseits als inhomogen bezeichnen, weil der Turbulenzgrad abhängig vom Ort im Strömungsfeld ist, andererseits als anisotrop aufgrund des unterschiedlich großen Turbulenzgrades in allen Raumrichtungen.

### 2.4.2 Turbulentes Längenmaß

Das turbulente Längenmaß ist eine weitere Größe zur Charakterisierung turbulenter Strömungen und kann als mittlere räumliche Ausdehnung einer Wirbelstruktur in einer der drei Raumrichtungen verstanden werden. In der Literatur finden sich hauptsächlich zwei Methoden, um dieses Längenmaß zu berechnen. Zum einen kann die Methode

der Autokorrelation verwendet werden, zum anderen kann das Längenmaß über eine Approximation der gemessenen Spektren und der von-Kármán-Spektren ermittelt werden [8]. Im Folgenden wird die Berechnung durch Autokorrelation erläutert, welche in der weiteren Arbeit verwendet wird.

Im ersten Schritt wird das charakteristische Zeitmaß  $T_i$  für die jeweilige Raumrichtung  $i = (x, y, z)$  berechnet, siehe Gleichung (2.18). Dafür werden die Autokovarianz- und Autokorrelationsfunktionen der Geschwindigkeitskomponenten analog zum Kapitel 2.3 berechnet. Die Integration des Korrelationskoeffizienten  $\rho_{ii}(\tau)$  von  $\tau = 0$  bis  $\tau_{\rho=0}$ , beziehungsweise die Stelle, an der die Autokorrelationsfunktion zum ersten Mal die Abszisse schneidet, liefert das sogenannte Integralmaß, welches der zeitlichen Ähnlichkeit der Strömung entspricht.

$$T_i = \int_0^{\tau_{\rho=0}} \rho_{ii}(\tau) d\tau \quad (2.18)$$

Die Übersetzung der zeitlichen Größe  $T_i$  in das räumliche turbulente Längenmaß  $L_i$  erfolgt mithilfe der Taylor-Hypothese der gefrorenen Turbulenz. Diese besagt, dass die Turbulenz als räumlich gefroren betrachtet werden kann, wenn die mittlere Strömungsgeschwindigkeit deutlich größer ist als die turbulenten Fluktuationen in der Strömung. Dies bedeutet, dass die turbulenten Strukturen in der Strömung transportiert werden und sich dabei nicht verändern. Das turbulente Längenmaß  $L_i$  kann unter Betrachtung der Taylor-Hypothese folgendermaßen herleitet werden:

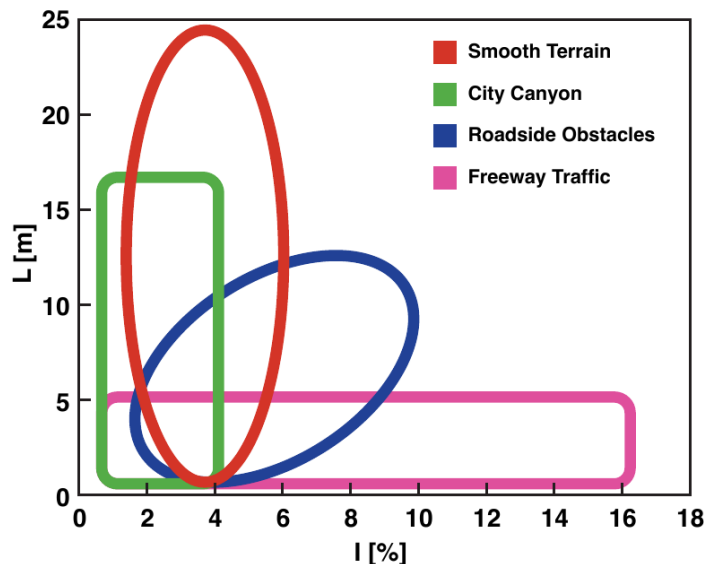
$$L_i = T_i \cdot \bar{v}_{Res} \quad (2.19)$$

wo  $i = (x, y, z)$ .

Der von Umweltfaktoren beeinflusste natürliche Wind ist, wie bereits in den obigen Absätzen erläutert wurde, der Fahrgeschwindigkeit überlagert. Bei einer konstanten Fahrgeschwindigkeit sind die auf das Fahrzeug wirkenden Geschwindigkeitsschwankungen nur vom natürlichen Wind und den genannten Faktoren bestimmt. Die Analyse derartiger Schwankungen mittels der vorgestellten Turbulenzgrößen ermöglicht das Charakterisieren der Anströmsituation auf der Straße.

In welchem Wertebereich sich die turbulente Intensität und das turbulente Längenmaß bei einer Straßenfahrt befinden, wurde von mehreren Autoren sowohl anhand theoretischer Abschätzungen als auch durch Fahrversuchen untersucht [9–12]. Die Straßenmessungen erfolgen durch das Anbringen von Messsonden am Fahrzeug, die die Anströmgeschwindigkeit unter unterschiedlichen Windbedingungen, unterschiedlicher Verkehrsdichte und unterschiedlicher Topografie erfassen und die

turbulente Anströmsituation charakterisieren lassen. Ein repräsentatives Beispiel dafür sind die von Wordley und Saunders [11, 12] durchgeführten Fahrversuche, welche nachträglich von Oettle [6] zusammengefasst wurden. Diese Ergebnisse sind in **Abbildung 2.2** dargestellt.



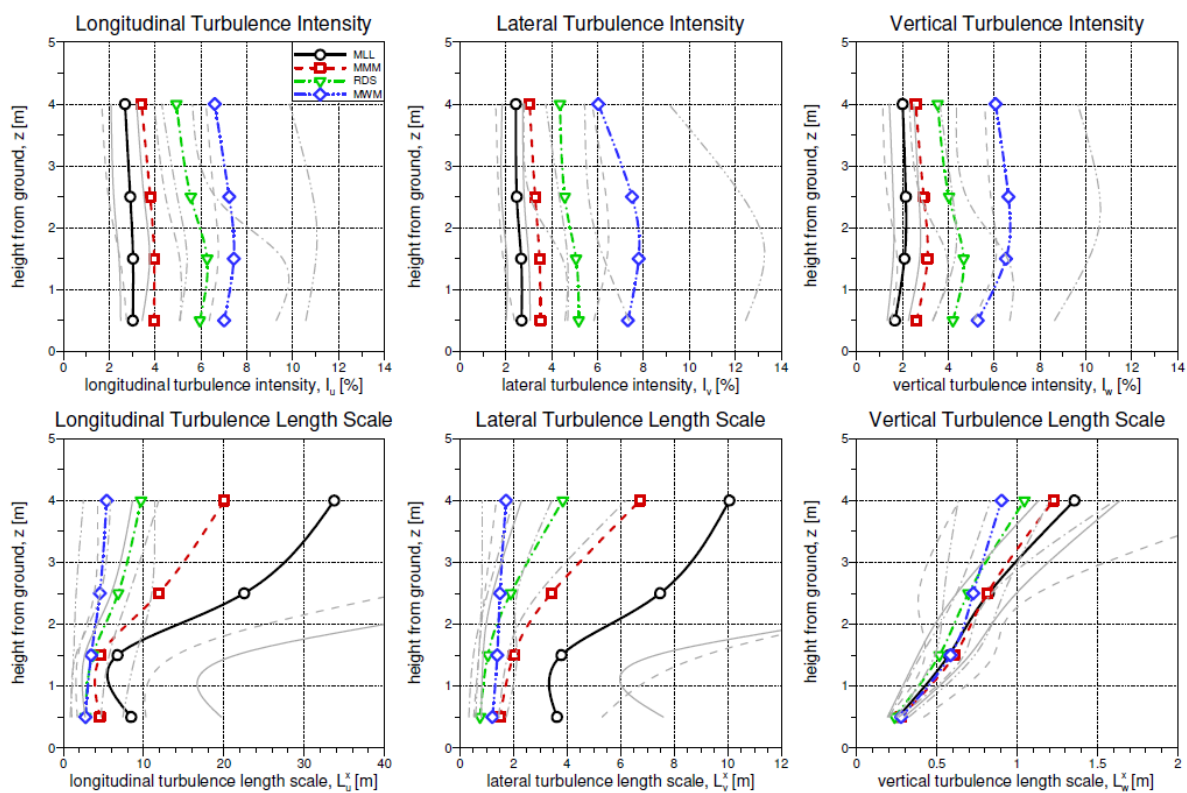
**Abbildung 2.2** Charakterisierung turbulenter Anströmsituation bei Straßenmessungen [6]

**Abbildung 2.2** zeigt, wie sich die Turbulenzgrößen in Abhängigkeit von der jeweiligen Topografie der Straße und des Verkehrsaufkommens verändern. Dabei lassen sich folgende unterschiedliche Anströmsituationen definieren: Fahrt auf Straßen mit flacher Topografie (Smooth Terrain), in der Stadt (City Canyon), auf Straßen mit Hindernissen am Straßenrand (Roadside Obstacles) und Straßen mit anderen Verkehrsteilnehmer (Freeway Traffic). Im „Smooth Terrain“, ohne hohe Verkehrsdichte, treten hohe Längenskalen und vergleichbar kleine turbulente Intensitäten auf. Aufgrund anderer Verkehrsteilnehmer werden dagegen im „Freeway Traffic“ vergleichsweise niedrige Skalenlängen und hohe turbulente Intensitäten beobachtet.

Analog zu den Untersuchungen von Wordley und Saunders wurden bis 2014 vom NRCC (National Research Council Canada) ähnliche Fahrversuche durchgeführt [13, 14]. Hierbei wurden nicht nur die Windverhältnisse auf Fahrzeughöhe aufgenommen, sondern auch bis zu einer maximalen Höhe von 4 m gemessen. Dafür wurde das Messfahrzeug unter anderem mit einem Gestell ausgestattet, welches das Anbringen von vier Sonden über dieser Höhe ermöglichte. Die Ergebnisse umfassen die Intensitäten und turbulenten Längen, die das Fahrzeug unter dem Einfluss unterschiedlicher Bedingungen erfährt. Zur Klassifizierung der Umgebungsbedingungen dienen die Beschaffenheit des Geländes (Bäume, Bebauung, etc.), die Verkehrsdichte und die Windstärke. Die berechneten turbulenten

Längen und Intensitäten der drei Geschwindigkeitskomponenten sind in **Abbildung 2.3** in Abhängigkeit der Höhe dargestellt. Dabei stellt die mit „MMM“ gekennzeichnete Kurve ein moderates Gelände, moderaten Verkehr und moderate Windbedingungen dar. Das Messfahrzeug erfuhr in 73% der Messzeit ein moderates Gelände, in 42% eine moderate Verkehrsdichte und in 65% moderate Windstärken [14].

Wie aus **Abbildung 2.3** ersichtlich wird, schwankt die turbulente Intensität der Kurven „MMM“ und „MLL“ in dem betrachteten Höhenbereich nur wenig, wohingegen die turbulenten Längen stark von der Höhe abhängen. Die Ergebnisse derartiger Untersuchungen sind aufgrund der Betrachtung in einer für Nutzfahrzeuge repräsentativen Höhe von 4 m von besonderer Bedeutung.



**Abbildung 2.3** Entwicklung der turbulenten Längen und Intensitäten über der Höhe [14]

### 2.4.3 Energiespektren

Die turbulente Intensität ist eine zeitlich gemittelte Größe, die die in einer Strömung enthaltene Energie quantifiziert. Die Darstellung der Verteilung der Energie in Abhängigkeit von der Frequenz erfolgt anhand der Autoleistungsdichtespektren  $S_{ii}(f)$  und wird als Energiespektrum bezeichnet. Die empirischen von-Kármán-Spektren (Gleichung (2.20) und (2.21)) beschreiben den energetischen Zustand der atmosphärischen Turbulenz und sind somit maßgebend für die Kraftfahrzeugaerodynamik [15].

$$S_{xx}(f_{Karman}) = \frac{4 \cdot \sigma_u^2 \cdot L_x}{\bar{v}_{res}} \left( \left( 1 + 70.18 \left( \frac{f_{Karman} \cdot L_x}{\bar{v}_{res}} \right)^2 \right) \right)^{-\frac{5}{6}} \quad (2.20)$$

$$S_{yy,zz}(f_{Karman}) = \frac{4 \cdot \sigma_{v,w}^2 \cdot L_{y,z}}{\bar{v}_{res}} \frac{\left( 1 + 187.16 \left( \frac{f_{Karman} \cdot L_x}{\bar{v}_{res}} \right)^2 \right)}{\left( 1 + 70.18 \left( \frac{f_{Karman} \cdot L_x}{\bar{v}_{res}} \right)^2 \right)^{\frac{11}{6}}} \quad (2.21)$$

Zur Berechnung der von-Kármán-Spektren sind neben den gemessenen Varianzen  $\sigma_i^2$  und dem turbulenten Längenmaß  $L_i$  außerdem noch die mittlere Strömungsgeschwindigkeit in Hauptströmungsrichtung  $\bar{v}_{res,x}$  und die Bandbreite der Frequenz  $f_{Karman}$  erforderlich. Diesem empirischen Modell zufolge enthalten die niederfrequenten, großskaligen Wirbelstrukturen viel Leistung, wohingegen die hochfrequenten Anteile (kleinskalige Strömungsphänomene) energetisch weniger signifikant sind.

## 2.5 Vorgehensweise zur numerischen Strömungssimulation

Die numerische Strömungssimulation, im Englischen Computational Fluid Dynamics (CFD), wird im Bereich der Fahrzeugentwicklung intensiv eingesetzt. Diese ermöglicht die numerische Untersuchung von virtuellen Prototypen in der frühen Entwicklungsphase sowie die Studie komplexer Strömungsphänomene, welche zum Teil schwer möglich mit Messtechnik erfasst werden können. Außerdem erlaubt die numerische Strömungssimulation, wie in dieser Arbeit belegt wird, die Abbildung realitätsnaher Strömungsbedingungen sowie die ausführliche Analyse derer Auswirkungen, beispielsweise auf die Aerodynamik, welche im Versuch nur mit großem Aufwand realisierbar wären.

Das vorliegende Unterkapitel befasst sich mit dem in dieser Arbeit verwendeten Strömungslöser sowie mit der Vorgehensweise zur Untersuchung der Fahrzeug-aerodynamik anhand numerischer Strömungssimulation.

### 2.5.1 Strömungslöser Simulia PowerFLOW®

Zur numerischen Berechnung von dreidimensionalen Strömungen wurde das kommerzielle Softwarepaket PowerFLOW® von Simulia verwendet. PowerFLOW® basiert auf einer diskreten Form der kinetischen Gastheorie, welche das

makroskopische Verhalten der Strömung aus dem mikroskopischen Verhalten des realen Gases ableitet. Dafür wird ein erweitertes Lattice-Boltzmann-Modell angewandt, bei dem sich die Partikel an diskreten Positionen im Raum (Lattice-Voxels) befinden und in Zeitintervallen in diskrete Richtungen bewegen [16–18].

Aufgrund der inhärenten zeitabhängigen Natur der Lattice-Boltzmann-Methode ist der Strömungslöser PowerFLOW® für die Durchführung transienter Berechnungen ausgelegt. Hierfür werden die in einer turbulenten Strömung vorhandenen instationären Vorgänge zur Konsistenz mit der Lattice-Boltzmann-Methode anhand eines zeitabhängigen Turbulenzmodells abgebildet. Hier handelt es sich um das VLES (Very Large Eddy Simulation) Modell und ein angepasstes RNG  $k - \varepsilon$  Modell für die nicht aufgelösten Großskalen.

Der Strömungslöser PowerFLOW® wird in der Automobilindustrie zur Untersuchung der Fahrzeugaerodynamik intensiv eingesetzt. Dabei kann die Umströmung komplexer Fahrzeugmodelle simuliert werden und aufgrund der automatisierten Diskretisierung des Rechengebiets sowie der effizienten Parallelisierbarkeit können die Rechenzeiten erheblich reduziert werden.

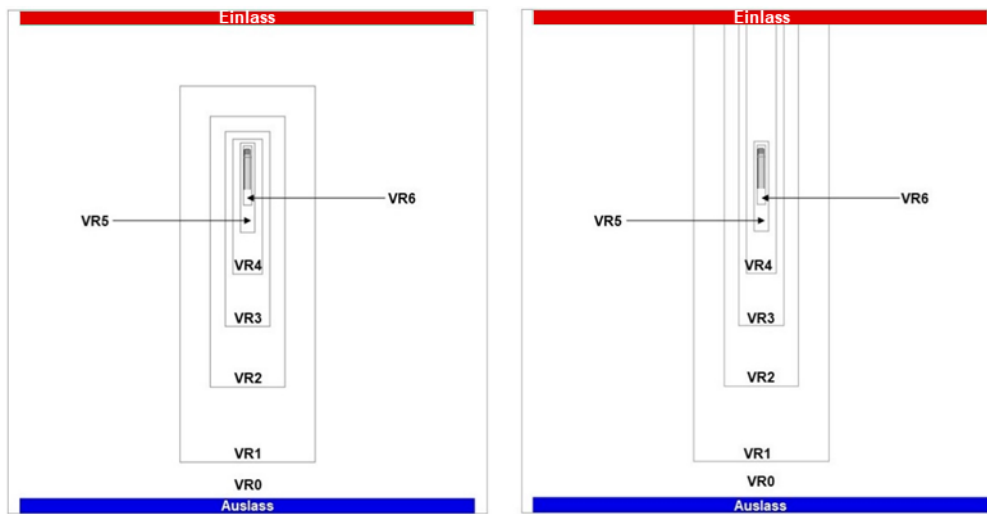
## 2.5.2 Untersuchung zur Aerodynamik anhand numerischer Simulation

Als Grundlage der im PowerFLOW® angewandten Lattice-Boltzmann-Methode dient die Boltzmann-Gleichung. Zur Lösung der diskretisierten Form der Boltzmann-Gleichung ist ein ebenfalls räumlich und zeitlich diskretisiertes Rechengebiet nötig. Außerdem werden zur Schließung des Gleichungssystems Randbedingungen benötigt.

Die folgenden Absätze geben einen Überblick über den Aufbau der numerischen Berechnung. Zunächst werden Rechengebiet, zeitliche bzw. räumliche Diskretisierungen und Randbedingungen beschrieben. Anschließend wird die Vorgehensweise zur Initialisierung der Simulationen dargelegt.

### Berechnungsgebiet und dessen räumliche Diskretisierung

Die Dimensionen des Rechengebiets werden entsprechend groß gewählt, um Interferenzeffekte zu vermeiden. Dadurch kann der Einfluss der Randbedingungen auf die Strömung um das zu untersuchende Fahrzeug verringert werden. Das Simulationsvolumen beträgt eine Länge von 193 m, eine Breite von 187 m und 102 m Höhe. Dies entspricht einem geometrischen Blockierungsverhältnis zwischen dem Querschnitt des Simulationsvolumens und der Fahrzeugstirnfläche von ungefähr 0,05%. Vom Einlass bis zum Fahrzeug kann sich die Strömung über eine Länge von 50 m entwickeln, wie in **Abbildung 2.4** zu erkennen ist.



**Abbildung 2.4** Rechengebiet und globale Verfeinerungsregionen um das Nutzfahrzeug bei stationärer (links) und instationärer (rechts) Anströmung

Zur Betrachtung komplexer Strömungsphänomene in Fahrzeugnähe ist eine hinreichende Auflösung der räumlichen Diskretisierung erforderlich. Bei der Simulation äußerer Strömungen wird das Rechengebiet um die berechnete Geometrie verfeinert. Mit zunehmendem Abstand zu dieser Geometrie nimmt die räumliche Auflösung immer weiter ab, da es nicht erforderlich ist, die ungestörte Anströmung feiner aufzulösen. **Abbildung 2.4** zeigt die unterschiedlichen globalen Verfeinerungsregionen (VR) des generierten kartesischen Gitters. Dabei entspricht der größten Verfeinerungsregion (VR0) eine Voxelgröße von 1280 mm, während die VR06 eine Voxelgröße von 20 mm aufweist.

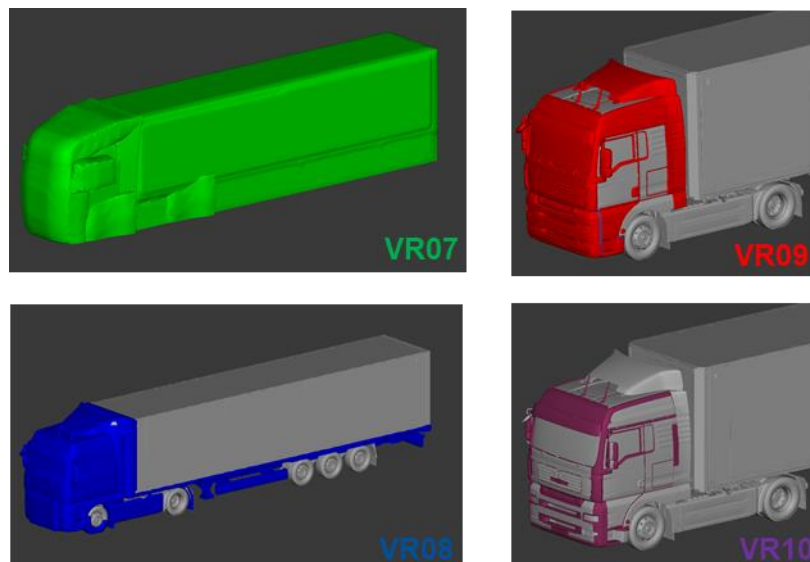
In **Abbildung 2.4** ist ersichtlich, dass die Verfeinerungsregionen im Fall einer instationären Anströmung bis zum Einlass erweitert werden müssen. Grund dafür ist die Notwendigkeit, die im Einlass vorgegebene instationäre Anströmung in das Rechengebiet zeitlich und räumlich ausreichend aufgelöst übertragen zu können. Dies bedeutet, dass die Frequenz der vorgegebenen instationären Randbedingung am Einlass konsistent mit der zeitlichen Auflösung im Rechengebiet sein muss, welche direkt von der Voxelgröße abhängt. Andernfalls können, bis die Strömung am Fahrzeug ankommt, Informationen verloren gehen. Zudem sind aufgrund numerischer Diffusionseffekte die Anzahl an Verfeinerungsregionsübergängen bis zum Fahrzeug ebenso zu vermeiden.



**Tabelle 2.1** Verfeinerungsregionen und Voxelgröße

VR Region	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Voxelgröße in mm	1280	640	320	160	80	40	20	10	5	2,5	1,25

Neben den oben dargestellten globalen Verfeinerungsregionen werden außerdem Bereiche zur Berücksichtigung der kleinskaligen Strömungsphänomene am Fahrzeug definiert. Die lokalen Verfeinerungsregionen ermöglichen insbesondere das Abbilden der Grenzschicht auf der Oberfläche des Fahrzeugs sowie eines Teils des Nachlaufs. Zusätzlich können dabei der Bereich der Staupunktströmung und die Ablösebereiche sowie der Unterboden genauer umfasst werden. Diese sind in **Abbildung 2.5** dargestellt, die entsprechenden Voxelgrößen sind in **Tabelle 2.1** aufgeführt.



**Abbildung 2.5** Lokale Verfeinerungsregion am Nutzfahrzeug

### Zeitliche Diskretisierung

Neben der räumlichen Auflösung ist außerdem eine geeignete zeitliche Auflösung der Strömungsberechnung notwendig. Durch die Wahl einer zu groben zeitlichen Auflösung können zeitlich kleinskalige Strömungsphänomene nicht mehr aufgelöst werden. Wird sie dagegen zu fein gewählt, so steigt der Rechenaufwand stark an. Deshalb ist analog zur räumlichen Diskretisierung ein Kompromiss zwischen Rechenzeit und Genauigkeit zu finden. Zur Festlegung des passenden Zeitschritts wird die Courant-Friedrichs-Lewy-Zahl (CFL-Zahl) angewandt. Sie gibt die Anzahl räumlicher Unterteilungen an, durch die sich eine betrachtete Strömungsgröße in einem Zeitschritt bewegt [19, 20].

$$\Delta t = \frac{CFL\_Zahl \cdot \Delta x, min}{u_{max}} \quad (2.22)$$

Die Zeitschrittweite  $\Delta t$  der Simulation kann über die Gleichung (2.22) berechnet werden. Dabei entspricht  $\Delta x, min$  die minimale Voxelgröße und  $u_{max}$  die im Rechengebiet maximal erwartete Strömungsgeschwindigkeit. Die CFL-Zahl wird von PowerFLOW® abhängig von der Art der simulierten Strömung vorgegeben. Im Fall einer äußeren, inkompressiblen und voll turbulenten Strömung entspricht der Wert 0,231675 [16].

### Randbedingungen

Zu der inkompressiblen Betrachtung der Strömung und deren Fluideigenschaften (**Tabelle A.1**) werden Randbedingungen in der numerischen Strömungsberechnung zur Lösung der Differentialgleichungen benötigt. Die Randbedingungen für die in dieser Arbeit durchgeführten numerischen Berechnungen wurden in Anlehnung an die Fahrbedingungen im Fahrversuch spezifiziert, sodass die Strömungsphänomene möglichst realitätsnah abgebildet werden. Hier wird besonderes Augenmerk auf das Abbilden der Anströmungssituation gelegt. Dafür wird am Einlass eine definierte Geschwindigkeit als Randbedingung vorgegeben. Die unterschiedlichen Verfahren zur Erzeugung von Einlassbedingungen mit Berücksichtigung des natürlichen Windverhaltens werden eingehend in Kapitel 4 und Kapitel 5 behandelt.

Um eine Überbestimmung des Gleichungssystems zu vermeiden, wird am Auslass eine Druckrandbedingung verwendet. Hier wird der statische Druck auf Höhe des Meeresspiegels vorgegeben. Außerdem wird die Dämpfung von Reflektionen am Auslass aktiviert.

An den gegenüberliegenden Seiten des Simulationsgebiets werden periodische Ränder verwendet. Dies bedeutet, dass die Strömung, die das Simulationsvolumen auf der einen Seite verlässt, auf der gegenüberliegenden Seite wieder in das Simulationsvolumen eintritt. Dies ist insbesondere bei seitlichen Anströmungen wichtig, um potentielle Blockierungseffekte zu vermeiden, welche die seitlichen Wände verursachen würden.

Zur Betrachtung der Relativgeschwindigkeit zwischen Boden und Fahrzeug wird der Boden mit einer Translationsgeschwindigkeit ausgestattet. Diese sollte zur Konsistenz mit den Fahrversuchen gleichgroß wie die auf der Versuchsstrecke aufgenommene Fahrgeschwindigkeit sein. Infolge des Geschwindigkeitsunterschieds zwischen Boden und der am Einlass vorgegebenen Anströmung, bilden sich kleinere Grenzschichten am Boden aus, deren Ursache einzig die Windgeschwindigkeit ist.

Zuletzt werden die Randbedingungen, welche das Fahrzeug betreffen, definiert. Die Fahrzeugoberfläche wird als reibungsbehaftete Wand betrachtet. Somit können sich Grenzschichten ausbilden, bevor die Strömung an der Dachkante und insbesondere am Heck ablöst. Die Rotation der Räder wird, analog zu [2], anhand einer vorgegebenen Rotationsgeschwindigkeit auf der Oberfläche von Reifen und Felgen modelliert. Um eine realistische Abbildung des Druckverlustes im Motorraum zu erzielen, werden der Kühler, der Kondensator und die zusätzlichen Wärmetauscher als poröse Medien mithilfe der Darcy-Forchheimer-Gleichung modelliert. Die Charakterisierung dieser porösen Medien erfolgte durch die von der MAN Truck&Bus zur Verfügung gestellten Referenzwerte.

### **Initialisierung und Simulationsprozess**

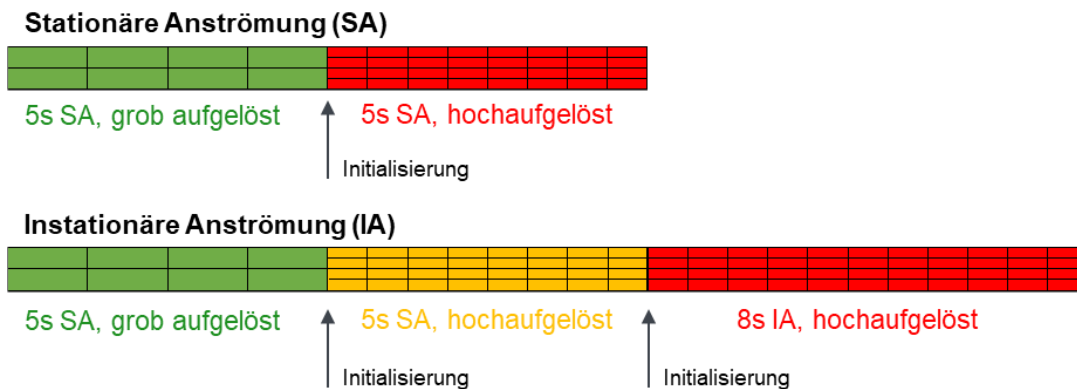
Infolge der inhärenten zeitabhängigen Natur des Lattice-Boltzmann-Verfahrens sind die mit PowerFLOW® durchgeführten Berechnungen transient. Dies bedeutet, dass am Anfang der Simulation eine Transition zur entwickelten Strömung stattfindet, bis sich die Strömung um das Fahrzeug topologisch etabliert hat. Die dabei gewonnenen Ergebnisse sind allerdings für die aerodynamische Untersuchung nicht relevant. An dieser Stelle spielt die Initialisierung eine wesentliche Rolle, um die Rechenzeiten sowie die Rechenkapazitäten zu reduzieren.

Bei der Simulation einer stationären Anströmung (Frontale- oder Schräganströmung) sollte zunächst eine Simulation auf einem räumlich grob aufgelösten Rechengitter durchgeführt werden. Hierfür werden die kleinsten Verfeinerungsregionen nicht berücksichtigt. Die gesamte Rechenzeit der grob aufgelösten Simulation sollte so gewählt werden, dass die Strömung um das Fahrzeug die entsprechenden topologischen Merkmale aufweist. Dafür sollte das Fahrzeug mehrfach überströmt werden und das Simulationsgebiet zumindest einmal vollständig durchströmt werden. Die Ergebnisse des letzten Zeitschritts werden anschließend zur Initialisierung der hochaufgelösten Simulation verwendet. Durch dieses Vorgehen stabilisiert sich die Strömungsberechnung schneller und es kann insgesamt Rechenzeit eingespart werden.

Das Vorgehen bei der Berechnung einer instationären Anströmung erfordert eine detailliertere Betrachtung. Hier muss besonderes Augenmerk der Initialisierung der instationären Anströmung gewidmet werden. Der Simulationsprozess ist in erster Linie analog zu dem oben beschriebenen. Das bedeutet, eine grob aufgelöste Simulation und anschließend eine Simulation auf einer hochaufgelösten Diskretisierung. Dabei muss idealerweise die grob aufgelöste Simulation mit einer bereits konvergierten Lösung initialisiert werden, um eine ausgebildete Strömungstopologie zu übernehmen. Bei der grob aufgelösten Simulation handelt es sich um eine stationäre Anströmung mit

den Einlassbedingungen des ersten Zeitschritts der anschließenden und hochaufgelösten instationären Simulation. Hiermit werden Diskontinuitäten in der vom Fahrzeug gesehenen Anströmung, welche zu Konvergenzproblemen führen können, vermieden.

Die beiden Simulationsprozesse bei Verwendung einer stationären bzw. instationären Einlassrandbedingung sind in **Abbildung 2.6** anschaulich dargestellt.



**Abbildung 2.6** Simulationsprozess

## 2.6 Stand der Technik

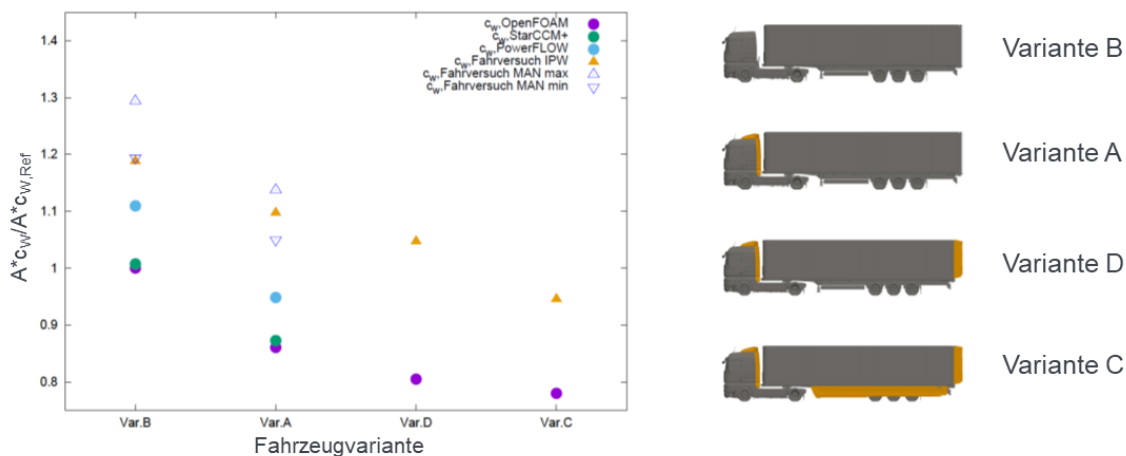
Klassischerweise werden die aerodynamischen Merkmale von Fahrzeugen unter der Bedingung einer stationären und frontalen Anströmung ermittelt. Allerdings ist das Fahrzeug in der Realität einer Vielzahl unterschiedlicher Umgebungsbedingungen ausgesetzt. Die Anströmsituation, die ein Fahrzeug auf der Straße erfährt, wird phänomenologisch durch die atmosphärischen und topographischen Bedingungen sowie durch Straßenverkehrsinteraktion bestimmt. Dabei hat beispielsweise der natürliche Seitenwind einen erheblichen Einfluss auf die Aerodynamik von Nutzfahrzeugen. Diese sind aufgrund ihres Länge-Breite-Verhältnisses besonders anfällig für die Seitenwindeinflüsse. Im Rahmen der Arbeiten [21] und [22] werden verschiedene generische Nutzfahrzeugkonfigurationen unter dem Einfluss stationärer Schräganströmung betrachtet. Es zeigt sich, dass es zur realitätsnahen Bestimmung des Widerstandsbeiwerts notwendig ist, nicht nur die ideale frontale Geschwindigkeitskomponente der Anströmung zu berücksichtigen. Bezüglich der Phänomenologie und der Quantifizierung des Seitenwindes sowie deren Einfluss auf Nutzfahrzeuge können weitere Erläuterungen den Berichten entnommen werden.

Die Anströmsituation auf der Straße stellt in der Regel jedoch keine stationäre Anströmung dar. Vielmehr ist das vom Fahrzeug gesehene Strömungsfeld durch eine räumlich und zeitlich variierende Strömungstopologie geprägt. Welchen Einfluss der Verkehr, das Gelände und die Windverhältnisse auf die turbulenten Größen einer

Strömung haben, wird von Wordley und Saunders [11, 12] anhand Fahrversuchen auf öffentlichen Straßen untersucht. Diese Ermittlung ermöglicht die Charakterisierung der turbulenten Anströmung in Abhängigkeit von Umwelteinflüssen. Deren Ergebnisse wurden in jüngster Vergangenheit, wie im Kapitel 2.4 vorgestellt, vom National Research Council Canada [14] erweitert. Hier werden unter anderem die Turbulenzgrößen des natürlichen Windes nicht nur in Bodennähe, sondern auch bis zu einer maximalen Höhe von 4 m über der Fahrbahn ermittelt. Die Kenntnis, welche charakteristische Strömung in einer für Nutzfahrzeuge repräsentativen Höhe herrscht, ist wesentlich, um das aerodynamische Verhalten derartiger Fahrzeugtypen zu interpretieren.

Im Vergleich zu Straßenmessungen und Fahrversuchen bieten Windkanalmessungen den Vorteil, dass sie vergleichsweise einfach durchzuführen sind und schon in frühen Entwicklungsstadien das Arbeiten mit Prototypen ermöglichen. Zu dem klassischen Prozess zur Bestimmung der Seitenwindempfindlichkeit eines Fahrzeugs unter stationären Anströmbedingungen im Windkanal, wird von Schröck [9] und Stoll [5] eine neuartige Methode vorgestellt, welche anhand eines am Düsenaustritts angebrachten Flügelsystems die auf der Straße vorhandenen instationären Strömungsverhältnisse im Windkanal abbilden lässt. Parallel zu der experimentellen Erzeugung solcher instationären Bedingungen im Windkanal, werden im Rahmen letztgenannter Arbeit auch diese Anströmsituationen anhand numerischer Strömungssimulation untersucht. Hierfür werden Anströmrandbedingungen vorgegeben, welche die Modellierung des genannten Flügelsystems abbilden und somit die entsprechenden Merkmale instationärer Anströmungen in der Simulationsumgebung ermöglichen. Eine gute Übertragbarkeit der experimentell beobachteten Phänomene in die Strömungssimulation wird dabei gewährleistet. Dadurch kann bereits in der Fahrzeugentwicklung eine Aussage über das aerodynamische Fahrzeugverhalten unter instationärer Anströmung getroffen werden.

Im Rahmen der Arbeiten des Arbeitskreises 9 der FAT wurden die aerodynamischen Eigenschaften eines realen Sattelzuges und dessen Varianten, welche durch die Anbringung von verschiedenen kommerziellen Luftleitkörpern aerodynamisch optimiert wurden, untersucht. Zu der Luftwiderstandsbestimmung im Fahrversuch wurden numerische Berechnungen mit unterschiedlichen Simulationswerkzeugen durchgeführt, die bei den OEMs produktiv eingesetzt werden [2].



**Abbildung 2.7** Normierter Luftwiderstandsbeiwert: Vergleich zwischen Fahrversuch und CFD unterschiedlicher Fahrzeugvarianten [2]

Die Durchführung der Fahrversuche erfolgte unter Berücksichtigung der Constant Speed Test (CST) Fahrversuchsprozedur. Die Auswertung zur Ermittlung des Luftwiderstandsbeiwerts wurde mithilfe des Programms VECTO Air Drag bestimmt. Für Details zu der Versuchsprozedur sowie zu dem Auswertungsprogramm sei auf Kapitel 3 verwiesen. Ebenso wurden die numerischen Berechnungen unter Beachtung des Stands der Technik, welcher bei den OEMs eingesetzt wird, durchgeführt. Hierfür wurde der Luftwiderstandsbeiwert, in Anlehnung zum Windkanal, unter frontaler und möglichst turbulenzarmer Anströmung bestimmt. Wie aus **Abbildung 2.7** zu entnehmen ist, zeigen die Untersuchungen, wie sich die im Fahrversuch gemessenen absoluten Luftwiderstandsbeiwerte deutlich von den numerisch berechneten unterscheiden. Dabei wiesen beide Verfahren, Fahrversuch und numerische Simulation, eine vergleichbare Prognosegüte in Bezug auf die geometrische Variation, beziehungsweise das Anbringen von aerodynamischen Maßnahmen, auf. Diese Studie ermöglicht die Bewertung der Simulationsergebnisse und der Ergebnisgenauigkeit sowie die Einschätzung der Prognosegüte der Simulationswerkzeuge im Vergleich zu den experimentell gewonnenen Daten. Zudem macht die genannte Studie ersichtlich, dass die Berücksichtigung instationärer Anströmbedingungen in der Strömungssimulation ein wichtiger Einflussfaktor darstellt, welcher zwingend erforderlich ist, wenn die Abbildung der Strömungssituation auf der Straße in der CFD angestrebt wird.

Neben den in [13] und [23] gezeigten Möglichkeiten zur Erzeugung instationärer Anströmbedingungen im Windkanal gibt es außerdem numerische Verfahren zur Anwendung in der CFD (siehe [5, 24, 25]). Jedoch beschränken sich die Studien auf die Aerodynamik des Pkw und die verwendeten Verfahren zur Abbildung der instationären Anströmung in der CFD stellten eine sehr begrenzte Anzahl an Ansätzen dar. Ebenso ist in der Literatur keine vorhandene Studie hinsichtlich der Charakterisierung der Anströmsituation vorhanden, welche bei Fahrversuchen von



Nutzfahrzeugen auftritt. Derartige Kennwerte, wie zum Beispiel die Turbulenzgrößen oder das Windverhalten im Fahrversuch, sind notwendig für die korrekte Auslegung der genannten numerischen Verfahren.

Im Folgenden wird anhand zahlreicher Fahrversuche von IPW Automotiv und MAN Truck&Bus die Natur der Anströmung sowie deren turbulente Eigenschaften gründlich analysiert und charakterisiert. Anschließend werden die möglichen Verfahren zur Berücksichtigung instationärer Anströmbedingungen in der Strömungssimulation ausführlich beschrieben. Weiterhin wird die Erzeugung der instationären Randbedingungen mit den verschiedenen Verfahren, basierend auf die im Fahrversuch erfassten Turbulenzmerkmale, untersucht.





### 3 Ermittlung des Luftwiderstandes im Fahrversuch

Um die durch die Verordnung (EU) 2019/1242 gesetzten Ziele zur Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes von Nutzfahrzeugen zu erreichen, bedarf es einer standardisierten Kalkulation und Deklaration von Emissionen. Dafür hat die EU die Entwicklung der Simulationssoftware Vehicle Energy Consumption calculation TOol (VECTO) in Auftrag gegeben, welche im Rahmen dieser Arbeit analysiert wurde. VECTO ist ein Zertifizierungsprogramm, das die Berechnung von CO<sub>2</sub>-Emissionen und Verbrauchswerten des Gesamtfahrzeugs in standardisierten Fahrzyklen durch den im Voraus bestimmten Energiebedarf der Einzelkomponenten übernimmt. Somit lassen sich mehrere Fahrzeugkonfigurationen berechnen, ohne jede einzelne Fahrzeugvariante im Gesamten zu testen.

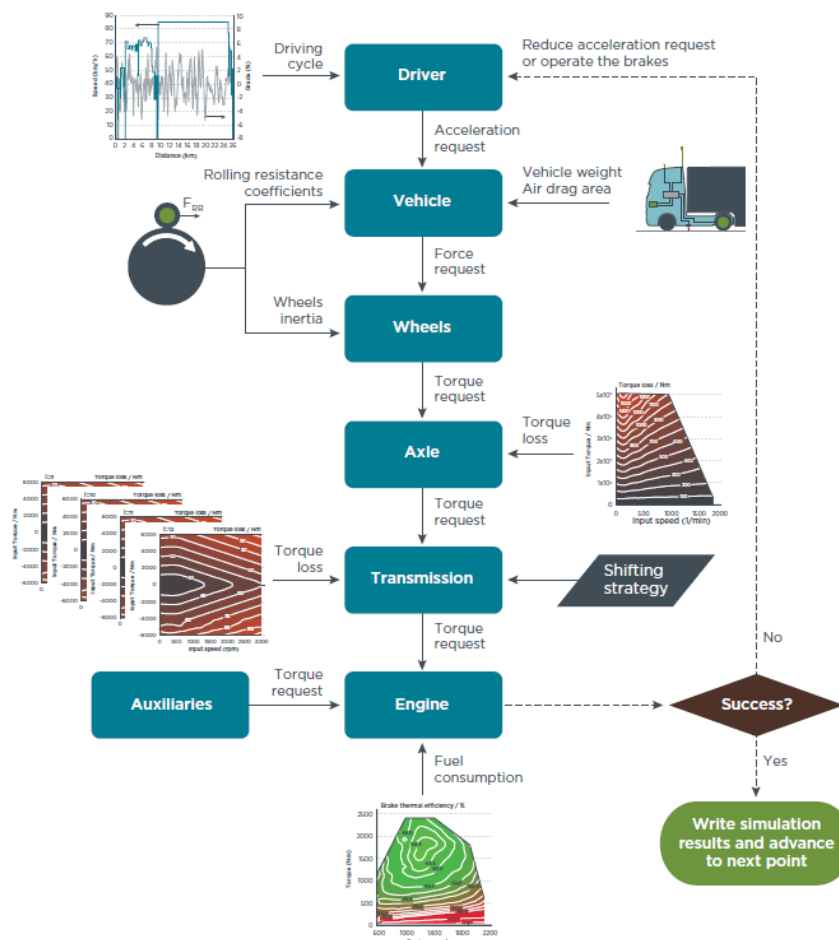


Abbildung 3.1 Aufbau und Arbeitsablauf vom VECTO [26]

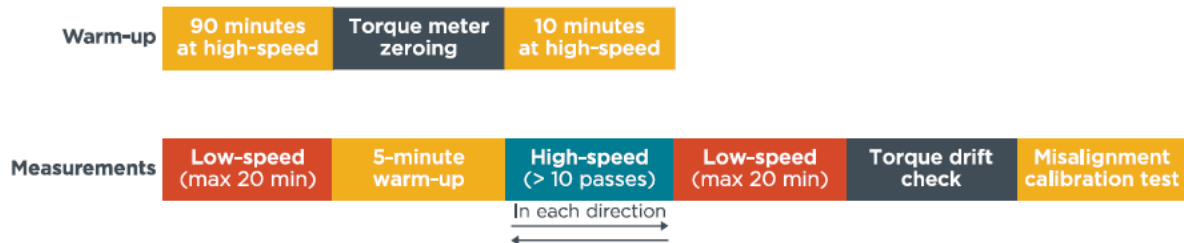
In **Abbildung 3.1** ist der Simulationsverlauf von VECTO mit den verschiedenen Modulen dargestellt. Das Programm verfügt über fünf verschiedene Fahrzyklen, die sich in Geschwindigkeit, Entfernung und Steigung unterscheiden. Zudem wandelt das Fahrer-Modul die Daten aus dem Fahrzyklus in einen Beschleunigungswunsch um, der im Fahrzeug-Modul, abhängig vom Luftwiderstandsbeiwert, Querschnittsfläche, Masse und Reibungskoeffizienten des Fahrzeugs, in einen Kraftwunsch übersetzt. Das Reifen-Modul berücksichtigt die Massenträgheit durch Rotation der Räder und wandelt den Kraftwunsch in einen Drehmomentwunsch um. Dieser wird anschließend an den Antriebsstrang, bestehend aus dem Achs- und dem Getriebe-Modul, weitergegeben. Die beiden Module beinhalten Verlustkennfelder, wobei im Getriebe-Modul noch zusätzlich die Schaltzeiten des Getriebes eingegeben werden, um, abhängig vom eingelegten Gang, den Wirkungsgrad zu bestimmen. Zusammen mit dem Drehmomentwunsch aus dem Nebenverbraucher-Modul, ergibt das einen Drehmomentwunsch an das Motor-Modul. Befindet sich das gewünschte Drehmoment innerhalb der Grenzen des Motorkennfeldes, lässt sich aus dem Verbrauchskennfeld in Abhängigkeit vom Drehmoment und von der Drehzahl ein statischer Punkt für den Kraftstoffverbrauch auslesen. Anschließend kann VECTO die entsprechenden CO<sub>2</sub>-Emissionen für den genannten Betriebspunkt berechnen und mit dem nächsten Simulationsintervall fortfahren [26].

Zur Berechnung der Motor-Modul-Funktionen und Auswertung der Messdaten des Luftwiderstandes existieren zwei eigenständige Programme, *VECTO Engine* und *VECTO Air Drag*. Dieses Kapitel beschäftigt sich mit *VECTO Air Drag* und dessen Bestimmung des Luftwiderstandes aus den Messdaten der Fahrversuche. Hierfür muss an erster Stelle die Fahrversuchsprozedur vorgestellt werden.

### 3.1 Fahrversuchsprozedur

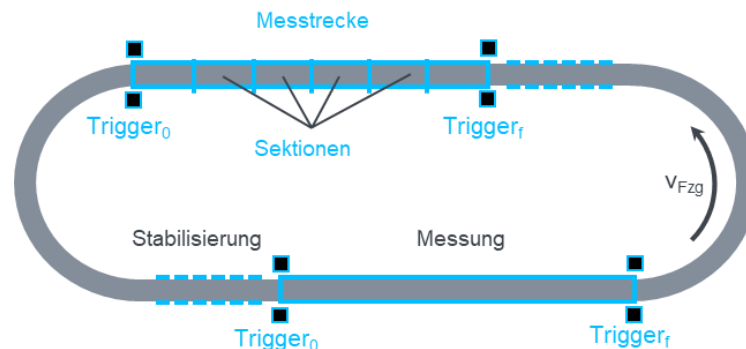
Die CST-Fahrversuchsprozedur (Constant Speed Test) ist nach Verordnung (EU) 2017/2400 [27] das einzige von der EU anerkannte Testverfahren zur Ermittlung des Luftwiderstandskoeffizienten, welches an einem schweren Nutzfahrzeug herangezogen werden darf. Diese Testprozedur basiert auf der Ermittlung des Fahrwiderstands einerseits bei einem Testlauf höherer Fahrgeschwindigkeit mit dem Luftwiderstand (High-Speed) als dominierende Kraft und andererseits bei einem Testlauf niedrigerer Fahrgeschwindigkeit (Low-Speed) mit dem Rollwiderstand als dominierende Kraft. Auf diese Weise lässt sich mithilfe des Programms VECTO Air Drag der Luftwiderstand im Fahrversuch anhand der gemessenen Fahrwiderstände auswerten und der entsprechende Luftwiderstandsbeiwert berechnen. Wichtige Voraussetzungen sind dabei zum einen, dass die Geschwindigkeit über der Messzeit möglichst konstant gehalten wird (Konstantfahrt), und zum anderen, dass das

Prüfgelände geeignet, insbesondere beinahe neigungsfrei sein muss. Zudem müssen die Fahrwiderstände  $F_W$ , Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{FZG}$ , Anströmgeschwindigkeit  $v_{Res}$  und Anströmwinkel  $\beta$  aufgenommen werden, um die nachträglichen Auswertung mit VECTO Air Drag zu ermöglichen (**Abbildung 3.4**).



**Abbildung 3.2** Chronologischer Ablauf der CST-Fahrversuchsprozedur [28]

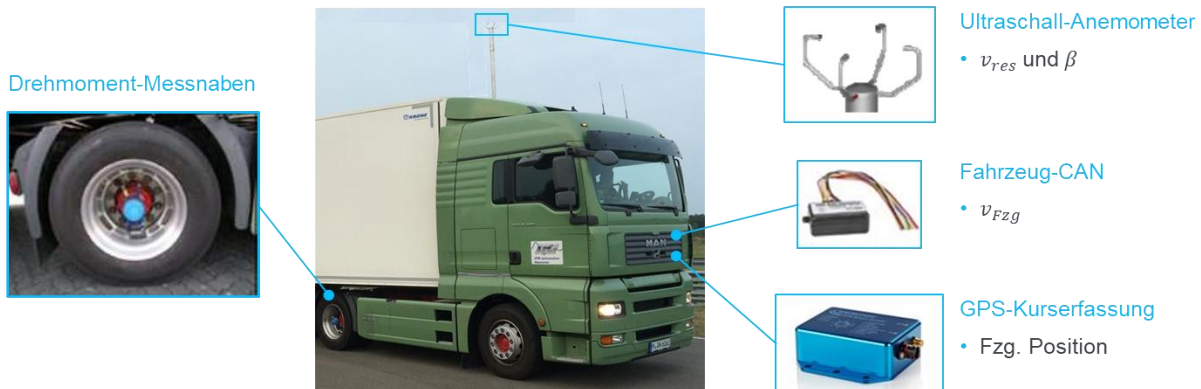
Wie in **Abbildung 3.2** zu sehen ist, beginnt die Testprozedur mit einem 90 minütigen Warmfahren und einem anschließenden Nullen der Messnaben zur Berücksichtigung des temperaturabhängigen Messnabendriffs. Die Messung erfolgt anhand einer definierten Sequenz von Testläufen. Im ersten Schritt wird ein Low-Speed-Testlauf bei einer Fahrgeschwindigkeit von 10 - 15 km/h durchgeführt. Anschließend findet der High-Speed-Testlauf bei 85 - 95 km/h statt. Dieser muss mindestens zehn Runden betragen. Zuletzt wird einen zweiten Low-Speed Testlauf gefahren, eine Driftkontrolle umgesetzt und ein Testlauf zur Kalibrierung des Ausrichtungsfehlers des Anemometers durchgeführt.



**Abbildung 3.3** Prüfgelände für den CST-Fahrversuch am Beispiel einer Oval-Teststrecke

Aufgrund der beiden möglichen Fahrtrichtungen in Bezug auf die Windrichtung eignet sich ein Oval-Prüfgelände besonders gut für die CST-Fahrversuchsprozedur. Beide Messstrecken werden in Messsektionen von 250 m Länge unterteilt. Nur die Messdaten in den ausgewählten Messsektionen werden nachträglich für die Auswertung in VECTO Air Drag verwendet. Zur Festlegung der Messsektionen können DGPS-Koordinaten für den Start und Endpunkt der Messsektion genutzt werden (DGPS-

Methode) oder alternativ mit optoelektronischen Lichtschranken (Trigger-Methode) gearbeitet werden, die ein Signal ausgeben, sobald das Fahrzeug die Messsektion betritt oder verlässt. Für jede Fahrtrichtung ist mindestens eine Messsektion zu definieren, die sich auf einer Geraden befindet. Wie in **Abbildung 3.3** skizziert, muss eine zusätzliche Länge zur Stabilisierung der Verhältnisse nach einer Kurve vorgesehen werden.



**Abbildung 3.4** Versuchsfahrzeug und Messausrüstung [2]

Zuletzt müssen bei einem auf die CST-Testprozedur basierenden Fahrversuch gewisse Grenzwerte hinsichtlich der Umgebungsbedingungen eingehalten werden. Gültige Versuchsbedingungen sind eine wesentliche Voraussetzung für das Erzielen regulärer Testergebnisse. Die Gültigkeitskriterien beinhalten unter anderem Luft- und Fahrbahntemperatur, Windstärke sowie mit dem maximal erlaubten Anströmwinkel und sind in ihrer Gesamtheit in [29] aufgelistet.

## 3.2 VECTO Air Drag

VECTO Air Drag ist ein Auswertungsprogramm [30] dessen Aufgabe es ist, durch die Messdaten eines unter Beachtung der CST-Testprozedur durchgeführten Fahrversuchs den Luftwiderstandsbeiwert  $c_w$  multipliziert mit der Querschnittsfläche des Nutzfahrzeugs bei einem Anströmwinkel  $\beta = 0^\circ$  zu bestimmen.

Die Ermittlung des Luftwiderstandskoeffizienten bei einem Anströmwinkel  $\beta = 0^\circ$  anhand der erfassten Messdaten erfolgt in zwei Schritten. Zuerst wird der Luftwiderstandskoeffizient in Abhängigkeit des Anströmwinkels  $c_w \cdot A(\beta)$  berechnet. Hierfür wird der Luftwiderstand als Differenz der Fahrwiderstände bei den oben genannten Fahrsituationen, High-Speed- und Low-Speed-Testläufen, ermittelt und die vom Fahrzeug erfahrene Anströmung anhand der durch das Anemometer aufgenommenen Geschwindigkeit berechnet. Dabei werden sowohl die Messdaten des Drehmomentmessers an der Radnabe als auch die des Anemometers korrigiert. Anschließend wird

eine Korrektur zur Berücksichtigung der Seitenwindempfindlichkeit des Fahrzeugs vorgenommen, sodass der Luftwiderstandskoeffizient unter frontaler Anströmung  $c_W \cdot A(0)$  bereitgestellt wird.

### 3.2.1 Luftwiderstandskoeffizient in Abhängigkeit des Anströmwinkels

Die Gleichung zur Berechnung des  $c_W \cdot A$ -Wertes in Abhängigkeit von  $\beta$  ist in VECTO Air Drag wie folgt implementiert, wobei der Term  $F_{res,ref} - F_0$  den Luftwiderstand darstellt und  $v_{air}$  die vom Fahrzeug gesehene Anströmgeschwindigkeit abbildet:

$$c_W \cdot A(\beta) = \frac{2 \cdot (F_{res,ref} - F_0)}{v_{air}^2 \cdot \rho_{air}} \quad (3.1)$$

Die von einer stationären Wetterstation gemessene Umgebungstemperatur wird zur Berechnung der Luftdichte  $\rho_{air}$  herangezogen.

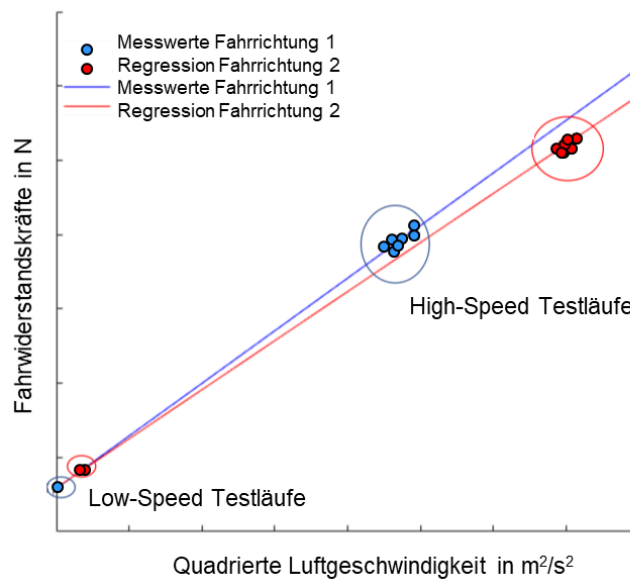
#### Berechnung des Luftwiderstands $F_{res,ref} - F_0$

Werden die Fahrwiderstände der Hauptgleichung des Fahrzeugs (3.2) betrachtet, lassen sich der Steigungswiderstand  $F_{Steig}$  in der Ebene sowie der Beschleunigungswiderstand  $F_{Beschl}$  bei einer Konstantfahrt vernachlässigen. Folglich wird für die Bestimmung des Luftwiderstands die Antriebskraft, die zur Überwindung der Widerstände aufgebracht wird, und der Rollwiderstand  $F_{Roll}$  benötigt.

$$F_W = F_{Roll} + F_{Luft} + F_{Steig} + F_{Beschl} \quad (3.2)$$

Die Ermittlung des Rollwiderstandes ( $F_0 = F_{Roll}$ ) erfolgt mathematisch durch die Messdaten von einerseits einem Testlauf höherer Geschwindigkeit (High-Speed) mit dem Luftwiderstand als dominierende Kraft und andererseits von einem Testlauf niedrigerer Geschwindigkeit (Low-Speed) mit dem Rollwiderstand als dominierende Kraft. Anhand einer linearen Regression der gemessenen Fahrwiderstände über der quadrierten Luftgeschwindigkeit kann der Schnittpunkt mit der Ordinatenachse festgestellt werden. Dieser entspricht, wie in **Abbildung 3.5** ersichtlich wird, dem gesuchten Rollwiderstand, da hier die Luftgeschwindigkeit 0 m/s beträgt und somit der Luftwiderstand vernachlässigt werden kann. Die lineare Regression wird für jede Richtung separat durchgeführt, wodurch sich für jede Fahrtrichtung ein eigener Rollwiderstand ergibt.

Durch die Anwendung der linearen Regression wird der Rollwiderstand als konstanter Wert angenommen, was bedeutet, dass die Geschwindigkeitsabhängigkeit des Rollwiderstands nicht berücksichtigt wird.



**Abbildung 3.5** Exemplarische Darstellung der Fahrwiderstände über der quadrierten Luftgeschwindigkeit und derer linearen Regression

### Berechnung der Anströmgeschwindigkeit $v_{air}$

Die Anströmgeschwindigkeit  $v_{air}$  zur Berechnung des  $c_W \cdot A$ -Wertes in Abhängigkeit von  $\beta$  (Gleichung (3.1)) muss die vom Fahrzeug im Fahrversuch gesehene Anströmgeschwindigkeit abbilden, wo für die Messdaten des Anemometers verwendet werden. Dafür müssen allerdings folgende Messdaten korrigiert werden [29]:

- Fahrzeuggeschwindigkeit
- Luftgeschwindigkeit
- Anströmwinkel

Um die reale Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{veh}$  zu erhalten, wird das vom CAN bereitgestellte Fahrzeuggeschwindigkeitssignal  $v_{veh,CAN}$  anhand des Korrekturfaktors  $f_{v,veh}$  folgendermaßen korrigiert werden:

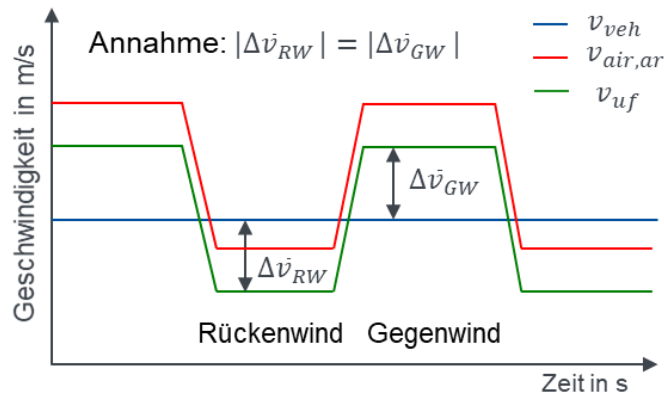
$$v_{veh} = v_{veh,CAN} \cdot f_{v,veh} \quad (3.3)$$

wo  $f_{v,veh}$  aus dem Quotient der durchschnittlichen Referenzgeschwindigkeit  $v_{ref,avrg}$  und der durchschnittlichen CAN-Geschwindigkeit  $v_{veh,CAN,avrg}$  gebildet wird. Dabei stellt die durchschnittliche Referenzgeschwindigkeit  $v_{ref,avrg}$  die Fahrzeuggeschwindigkeit zur Überquerung einer Sektion nach Gleichung (3.5) dar.

$$f_{v,veh} = \frac{v_{ref,avrg}}{v_{veh,CAN,avrg}} \quad (3.4)$$

$$v_{ref,avrg} = \frac{l_{section}}{l_{section}} \quad (3.5)$$

Aufgrund des Fahrzeugeinflusses, welcher die Beschleunigung der Strömung in Fahrzeughöhe aufgrund der Verdrängung des Fahrzeugs beschreibt, ist die durch das Anemometer erfasste Luftgeschwindigkeit  $v_{air,ar}$  höher als die störungsfreie Luftgeschwindigkeit  $v_{uf}$ . Zur Korrektur der gemessenen Luftgeschwindigkeit wird angenommen, dass die Auswirkung des Fahrzeugeinflusses in beide Fahrtrichtungen, sowohl unter Gegenwind- als auch unter Rückenwindrichtung, gleichermaßen auftritt. Auf diese Weise wird, wie **Abbildung 3.6** zu entnehmen ist, die gemessene Luftgeschwindigkeit um die Fahrzeuggeschwindigkeit zentriert und dabei unter der oben genannten Annahme korrigiert.



**Abbildung 3.6** Skizze zur Darstellung der Korrektur des Fahrzeugeinflusses an einem gemessenen  $v_{air,ar}$ -Signal

Der Korrekturfaktor  $f_{vpe}$  sorgt dafür, dass die gemessene Luftgeschwindigkeit sowohl bei Gegenwindrichtung als auch unter Rückenwindrichtung reduziert und die Geschwindigkeitserhöhung durch den Fahrzeugeinfluss herausgerechnet wird. Zur Berechnung des Korrekturfaktors  $f_{vpe}$  wird der Mittelwert der durchschnittlich gemessenen Luftgeschwindigkeit in Fahrtrichtung 1  $v_{air,ar,avrg,1}$  und Fahrtrichtung 2  $v_{air,ar,avrg,2}$  gebildet. Die durchschnittliche Fahrzeuggeschwindigkeit  $v_{veh,avrg}$ , die durch den Geschwindigkeitsfaktor  $f_{v,veh}$  bereits korrigiert wurde, wird durch diesen Wert gemäß folgender Gleichung (3.6) geteilt.

$$f_{vpe} = \frac{v_{veh,avrg}}{1/2 \cdot (v_{air,ar,avrg,1} + v_{air,ar,avrg,2})} \quad (3.6)$$

$$v_{uf} = v_{air,ar} \cdot f_{vpe} \quad (3.7)$$

Eine genaue Ausrichtung des Anemometers am Auflieger kann schwer gewährleistet werden, sodass von einem Ausrichtungsfehler, der den gemessenen Anströmwinkel verfälscht, ausgegangen werden kann. Um diesen Ausrichtungsfehler  $\beta_{ame}$  ausfindig zu machen, wird eine ausgewählte Sektion im Laufe des Kalibrierungstestlaufs in beiden Fahrtrichtungen gefahren. Unter der Annahme, dass die gemessenen durchschnittlichen Anströmwinkel in jede Fahrtrichtung  $\beta_{ar,avg,x}$  gleichwertig sind, lässt sich laut [29] der Ausrichtungsfehler folgendermaßen als Mittelwert beider Fahrtrichtungen berechnen:

$$\beta_{ame} = \frac{(\beta_{ar,avg,1} + \beta_{ar,avg,2})}{2} \quad (3.8)$$

Um den tatsächlichen Anströmwinkel  $\beta_{uf}$  zu erhalten, wird der Ausrichtungsfehler  $\beta_{ame}$  von jedem gemessenen Anströmwinkel  $\beta_{ar}$  subtrahiert.

$$\beta_{uf} = \beta_{ar} - \beta_{ame} \quad (3.9)$$

Die Korrektur der gemessenen Anströmwinkel von allen Testläufen (Low-Speed und High-Speed) erfolgt durch den Ausrichtungsfehler  $\beta_{ame}$ , der im Kalibrierungstestlauf ermittelt wurde.

Anhand der korrigierten Strömungsgrößen ( $v_{uf}$  und  $\beta_{uf}$ ) und der korrigierten Fahrgeschwindigkeit  $v_{veh}$  lassen sich die Windgeschwindigkeitskomponenten mittels Trigonometrie auf der Höhe des Anemometers  $h_a$  berechnen:

$$v_{windx}(h_a) = v_{uf} \cdot \cos(\beta_{uf}) - v_{veh} \quad (3.10)$$

$$v_{windy}(h_a) = v_{uf} \cdot \sin(\beta_{uf}) \quad (3.11)$$

$$v_{wind}(h_a) = \sqrt{(v_{windx}(h_a))^2 + (v_{windy}(h_a))^2} \quad (3.12)$$

In VECTO Air Drag wird zur Berücksichtigung einer atmosphärischen Grenzschicht die Windgeschwindigkeit als Geschwindigkeitsgradient mit einem Rauheitsexponenten von  $\delta = 0,2$  dargestellt. Folglich werden die Windgeschwindigkeitskomponenten als Funktion der Höhe  $h$  nach Gleichung (3.13) und Gleichung (3.14) formuliert.

$$v_{windx}(h) = v_{windx}(h_a) \cdot \left(\frac{h}{h_a}\right)^\delta \quad (3.13)$$



$$v_{windy}(h) = v_{windy}(h_a) \cdot \left(\frac{h}{h_a}\right)^\delta \quad (3.14)$$

Zuletzt werden die Anströmgeschwindigkeit  $v_{air}(h)$  und der Anströmwinkel  $\beta(h)$ , welche das Fahrzeug erfährt, durch Trigonometrie und in Abhängigkeit der Höhe formuliert. Anschließend wird deren Integralform  $v_{air}$  und  $\beta$ , die die Berechnung des  $c_W \cdot A$ -Wertes in Abhängigkeit von  $\beta$  ermöglicht, über der Fahrzeughöhe  $h_v$  berechnet.

$$v_{air}(h) = \sqrt{(v_{windx}(h) + v_{veh})^2 + (v_{windy}(h))^2} \quad (3.15)$$

$$\beta(h) = \arctan\left(\frac{v_{windy}(h)}{v_{veh} + v_{windx}(h)}\right) \quad (3.16)$$

$$v_{air} = \frac{1}{h_v} \cdot \int_0^{h_v} v_{air}(h) dh \quad (3.17)$$

$$\beta = \frac{1}{h_v} \cdot \int_0^{h_v} \beta(h) dh \quad (3.18)$$

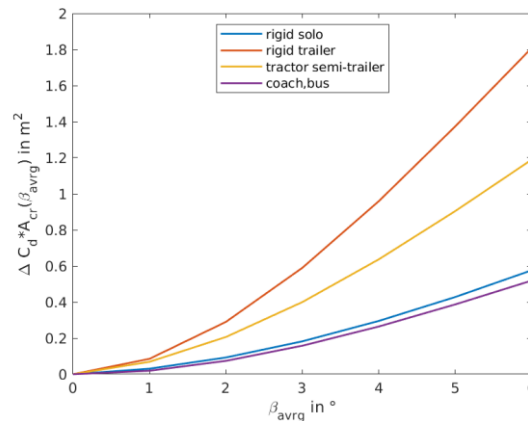
### 3.2.2 Luftwiderstandskoeffizient unter frontaler Anströmung

Die Berechnung des  $c_W \cdot A$ -Wertes in Abhängigkeit von  $\beta$  erfolgt für jede Fahrtrichtung und mit Berücksichtigung der ausgewählten Sektionen separat. Der  $c_W \cdot A(\beta)$ -Wert des gesamten Fahrversuchs wird als Mittelwert der beiden  $c_W \cdot A$ -Werte, aus Fahrtrichtung 1 und Fahrtrichtung 2, gebildet. Ebenso wird ein absoluter Anströmwinkel  $\beta_{avg}$  für den gesamten Fahrversuch berechnet. Dieser ergibt sich aus dem Mittelwert der durchschnittlichen Anströmwinkel  $\beta$  der zwei Fahrtrichtungen. Unter der Annahme, dass das Nutzfahrzeug symmetrisch auf die seitliche Anströmung reagiert, lässt sich mithilfe eines generischen Polynoms (Gleichung (3.19)) die Seitenwindempfindlichkeit des Nutzfahrzeugs feststellen (**Abbildung 3.7**).

$$\Delta c_W \cdot A(\beta_{avg}) = a_1 \cdot \beta_{avg} + a_2 \cdot \beta_{avg}^2 + a_3 \cdot \beta_{avg}^3 \quad (3.19)$$

Zur Ermittlung des  $c_W \cdot A$ -Wertes unter frontaler Anströmung wird die Seitenwindempfindlichkeit vom  $c_W \cdot A(\beta)$ -Wert subtrahiert. Der resultierende Wert wird auf eine je nach Fahrzeugklasse andere Referenzhöhe  $H_{ref}$  korrigiert. Zudem ist der Luftwiderstand, der sich durch das Anemometer ergibt, zu berücksichtigen. Hierbei wird ein  $c_W \cdot A_{Anemo}$  von 0,15 m<sup>2</sup> nach Gleichung (3.20) abgezogen.

$$\Delta c_W \cdot A(0) = \left( \Delta c_W \cdot A(\beta) - \Delta c_W \cdot A(\beta_{avg}) \right) \cdot \frac{H_{ref}}{H_{meas}} - c_W \cdot A_{Anemo} \quad (3.20)$$



**Abbildung 3.7** Korrektur der Seitenwindempfindlichkeit unterschiedlicher Fahrzeugtypen

### 3.3 Charakterisierung der Strömungssituation im Fahrversuch

Die im Fahrversuch aufgenommenen Messdaten dienen nicht nur VECTO Air Drag zur Berechnung des Luftwiderstandsbeiwertes. Diese können zum besseren Verständnis der Umgebungsbedingungen im Versuch auch anderweitig ausgewertet werden. Insbesondere ermöglicht eine ausführliche Analyse der durch das Anemometer erfassten Anströmgeschwindigkeit und Anströmwinkel die Charakterisierung der Anströmung, die das Nutzfahrzeug während des Fahrversuchs erfährt. Die aufgenommenen Messsignale beinhalten nicht nur Informationen zur Windrichtung und -stärke, sondern auch über die inhärenten Einflüsse der Topografie, des Bewuchses und der Bebauung auf der Messstrecke. Die Charakterisierung der Strömungssituation impliziert somit eine Beschreibung der Anströmung, welche auf einem konkreten Prüfgelände zu erwarten ist.

Anschließend werden zahlreiche Fahrversuche analysiert, welche mithilfe der in den Kapiteln 2.3 und 2.4 gezeigten Verfahren ausgewertet wurden. Alle Fahrversuche haben gemeinsam, dass sie auf dem Prüfgelände Dekra Test Oval in Klettwitz stattfanden, sowie, die Durchführung unter Beachtung der CST-Testprozedur. Diese erfolgten zudem mit jeweils zwei unterschiedlichen Prüffahrzeugen der Firma MAN Truck&Bus. Die Gesamtheit der vorhandenen Messdaten beträgt, nach Isolierung der Messstrecken, über 4 Stunden auswertbare Messzeit. Die Auswertung einer

derartigen Datenmenge erfordert einen vollständigen und automatisierten Prozess, welcher in dieser Arbeit in MATLAB® implementiert wurde.

### 3.3.1 Fahrversuche von IPW Automotive

Im Rahmen der Arbeiten des Arbeitskreises 9 der FAT wurden im Sommer 2015 Fahrversuchen verschiedener Sattelzugvarianten durch die Firma IPW Automotiv GmbH durchgeführt [2].

Bei dem Versuchsfahrzeug handelte es sich um eine Zugmaschine Modell TGA 18.480 des Herstellers MAN Truck&Bus und einem Krone 3-Achs-Sattelaufleger mit Kofferaufbau des Typs Dry Liner. Besonderes Augenmerk wird für die Charakterisierung der Strömungssituation der Variante mit angebrachtem Dachspoiler und seitlichen Windleitkörpern an der Zugmaschine gewidmet (**Abbildung 3.8**). Diese Fahrzeugkonfiguration dient aufgrund ihrer allgemeinen Ausstattung als Referenz für die numerischen Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit.

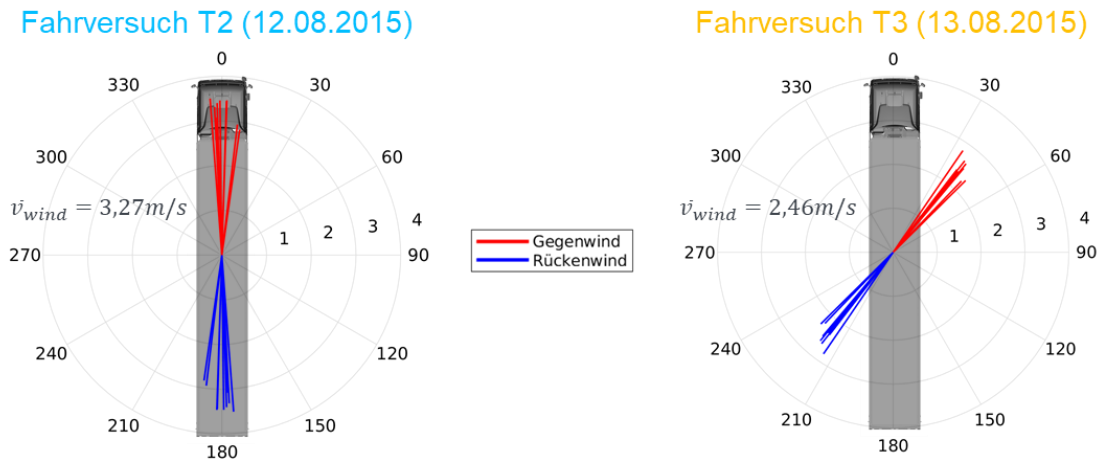


**Abbildung 3.8** Versuchsfahrzeug MAN-TGA [2]

Das oben vorgestellte Versuchsfahrzeug wurde zur Gewährleistung der Messreproduzierbarkeit an zwei unterschiedlichen Messtagen untersucht. Die Versuche fanden jeweils bei erheblich unterschiedlichen Windverhältnissen statt. Die dabei entstandenen Messdaten werden anschließend analysiert.

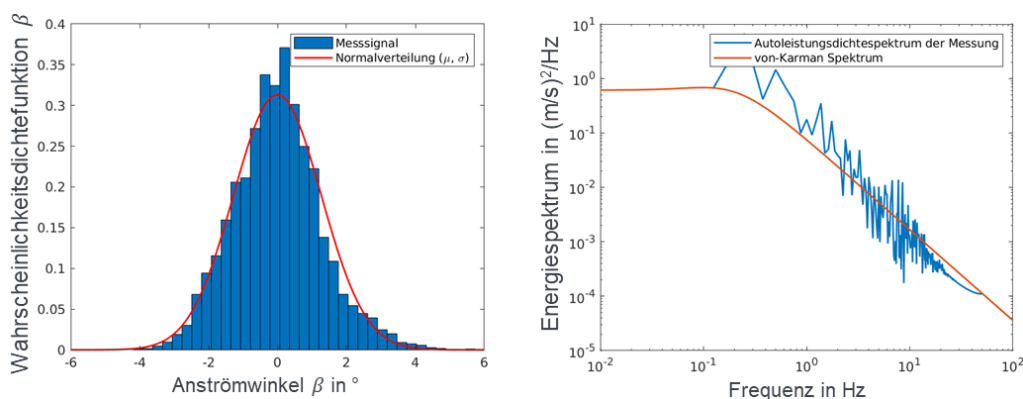
Das Nutzfahrzeug ist während des Fahrversuchs Windbedingungen ausgesetzt, welche sich anhand der erfassten Strömungsgrößen und der trigonometrischen Ableitung der Gleichungen (2.4) und (2.5) rekonstruieren lassen. Die Windsituation, welche durch die Windstärke  $v_{wind}$  und die Windrichtung  $\alpha$  ergibt, ist in **Abbildung 3.9** für beide Messtage mithilfe einer Polar-Grafik dargestellt. Aufgrund der Fahrweise auf einem Oval-Prüfgelände sind, unter Gegenwind oder bei Rückenwind in Abhängigkeit der gefahrenen Gerade, zwei Windsituationen zu erkennen. Wie der **Abbildung 3.9** zu entnehmen ist, waren die Windverhältnisse des *Fahrversuchs T3* von einer seitlichen Windkomponente geprägt. Beide Fahrversuche zeigen eine vergleichbare Streubreite des Windwinkels  $\alpha$ , allerdings weist der *Fahrversuch T3* eine um 33%

niedrigere durchschnittliche Windstärke  $\bar{v}_{Wind}$  auf, welche auf eine höhere Interaktion des Windes mit Hindernissen am Straßenrand hinweisen könnte.



**Abbildung 3.9** Windsituation: Entwicklung der Windstärke  $v_{Wind}$  über der Windrichtung  $\alpha$  für die gefahrenen Strecke im Fahrversuch

Die Anströmsituation, die das fahrende Nutzfahrzeug erfährt, lässt sich durch die resultierende Anströmgeschwindigkeit  $v_{Res}$  und den Anströmwinkel  $\beta$  nach **Abbildung 2.1** definieren. Der Anströmwinkel spielt eine wesentliche Rolle bei der Charakterisierung der Strömungssituation. Wie in **Abbildung 3.10** veranschaulicht werden kann, darf die vom Fahrzeug gesehene Anströmung in keinerlei Hinsicht als eine ideale Frontalanströmung betrachtet werden. Diese ähnelt stark einer statistischen Normalverteilung. Allerdings sind bei einem ausgeprägten Seitenwindverhalten im Fahrversuch Änderungen der statistischen Schiefe und Wölbung der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Anströmwinkels  $\beta$  zu erkennen.



**Abbildung 3.10** Anströmsituation: Anströmwinkel im gesamten *Fahrversuch T2* (links). Energiespektrum der  $v_{Res,y}$  auf einer Sektion (rechts)

In **Tabelle 3.1** ist die statistische Beschreibung der Anströmsituation beider Fahrversuche gegenübergestellt. Diese weisen eine um  $\beta = 0^\circ$  zentrierte

Anströmwinkelverteilung auf. Zudem entspricht die größere  $\sigma(\beta)$  des *Fahrversuchs T3* einem breiteren  $\beta$ -Spektrum.

**Tabelle 3.1** Charakterisierung des Anströmwinkels  $\beta$  für den gesamten Fahrversuch

	Mittelwert ( $\mu$ )	Standardabweichung ( $\sigma$ )
Fahrversuch T2	-0,005°	1,27°
Fahrversuch T3	-0,3°	4,44°

Die turbulenten Eigenschaften der Anströmung werden mit den im Unterkapitel 2.4 vorgestellten Turbulenzgrößen gekennzeichnet. Hierfür wird zur Berechnung der Turbulenzgrößen ein bestimmtes Zeitfenster mit einer Zeitdauer von 8 s betrachtet, um die aufgenommenen Messsignale der Strömungsgrößen auszuwerten. Das festgelegte Zeitfenster stellt eine vergleichbare Dauer wie die nötige Zeitdauer zur Überquerung einer Sektion dar, sodass die turbulente Beschreibung der Anströmung auf diese Weise auch an physikalische Bedeutung gewinnt.

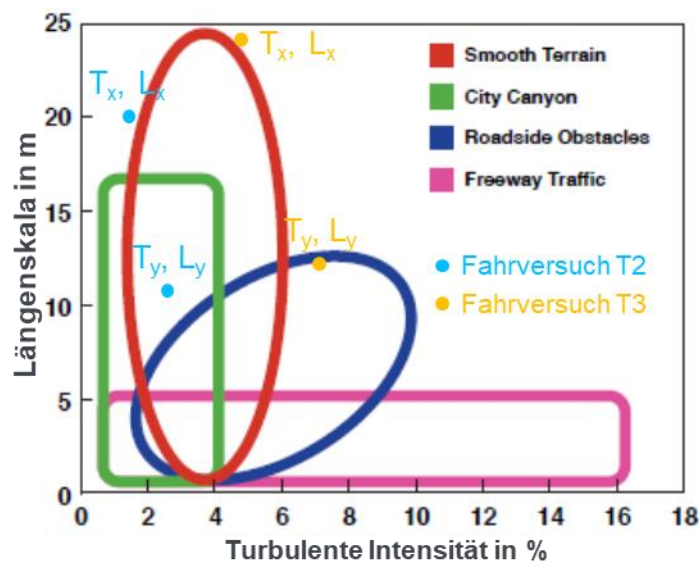
Die durchschnittlichen Werte der Turbulenzgrößen, wie dem Längenmaß und der turbulenten Intensität sind in **Tabelle 3.2** in Abhängigkeit der räumlichen Komponente aufgetragen. Im Allgemeinen ist die Größenordnung der Werte beider Fahrversuche vergleichbar. In beiden Fällen zeigen die durchschnittlichen Werte der Querkomponente der Anströmung kleinere Längenskalen, aber gleichzeitig eine höhere turbulente Intensität, was auf die topografischen Einflüsse zurückzuführen ist. Zudem sind beim *Fahrversuch T3* sowohl größere Längenskalen als auch höhere turbulente Intensitäten zu erkennen, die auf ungünstigere Windverhältnisse und die Interaktion mit der Topografie hindeuten.

**Tabelle 3.2** Gemittelte turbulente Größen aus dem Fahrversuch

	Turbulente Länge ( $L_x$ )	Turbulente Länge ( $L_y$ )	Turbulente Intensität ( $T_x$ )	Turbulente Intensität ( $T_y$ )
Fahrversuch T2	20,5m	11,1m	1,5%	2,2%
Fahrversuch T3	24,9m	13,6m	4,4%	7,8%

Eine weitere Interpretation der Strömungssituation kann mithilfe der Arbeiten von Wordley und Saunders [11, 12] durchgeführt werden. Die Autoren definierten anhand von Straßenmessungen  $L_i$ - $T_i$ -Bereiche und legten deren Zusammenhang mit den Umwelteinflüssen fest. Auf diese Weise können die erwarteten Eigenschaften der Anströmung als Funktion der berechneten Turbulenzgrößen in **Abbildung 3.11** abgelesen werden. Dadurch kann sichergestellt werden, dass die Anströmsituation im *Fahrversuch T2* in einer charakterisierten „Smooth Terrain“-Umgebung stattgefunden

hat, was einer Anströmsituation mit begrenzten Umwelteinflüssen entspricht. Im Gegenteil dazu zeigt der *Fahrversuch T3*, trotz der gleichen gefahrenen Messstrecke, eine andere Strömungssituation. Während die longitudinale Komponente der Anströmung ( $L_x$ ,  $T_x$ ) eine Fahrt auf einer Strecke mit flacher Topografie darstellt, werden die Querkomponenten der Anströmung ( $L_y$ ,  $T_y$ ) nach **Abbildung 3.11** als „Roadside Obstacles“ charakterisiert. Dies deutet erneut daraufhin, dass die ausgeprägten Seitenwindverhältnisse im *Fahrversuch T3* stark mit der Topografie interagieren und somit die vom Fahrzeug erfahrene Anströmung signifikant beeinflussen.



**Abbildung 3.11** Charakterisierung der turbulenten Anströmsituation im Fahrversuch (in Anlehnung an [6])

### 3.3.2 Fahrversuche von MAN Truck&Bus

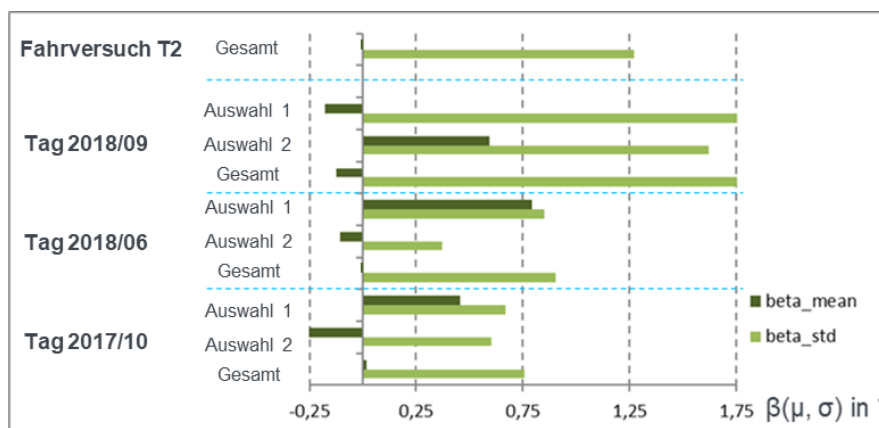
In den Jahren 2017 und 2018 führte die Firma MAN Truck&Bus eine Fahrversuchskampagne auf dem Prüfgelände Dekra Test Oval durch. Zur Erweiterung der Kenntnisse der Strömungssituation auf diesem Prüfgelände stellte MAN Truck&Bus 12 vollständige Fahrversuche mit dem Fahrzeugtyp MAN-TGX zur Verfügung (**Abbildung 3.12**).



**Abbildung 3.12** Versuchsfahrzeug MAN-TGX

Die Fahrversuche wurden sowohl komplett als auch unter Betrachtung der von MAN Truck&Bus ausgewählten Sektionen ausgewertet. Auf diesen Grund wird in der folgenden Analyse zwischen der Betrachtung des gesamten Messtages, welche als „Gesamt“ bezeichnet wird, sowie der Betrachtung, bei welcher es sich um eine Sektionsauswahl handelt, unterschieden.

In **Abbildung 3.13** ist die statistische Beschreibung des Anströmwinkels  $\beta$  unterschiedlicher Fahrversuche dargestellt. Wie aus der Grafik zu entnehmen ist, sind die durchschnittlichen Werte des Anströmwinkels vergleichbar klein und hängen stark von der Sektionsauswahl ab. Dies kann insbesondere bei der Betrachtung des gesamten Messtages erkannt werden, welche aufgrund der größeren Streubreite des  $\beta$  für eine Reduktion des Mittelwertes und zugleich für eine höhere Standardabweichung von  $\beta$  sorgt.

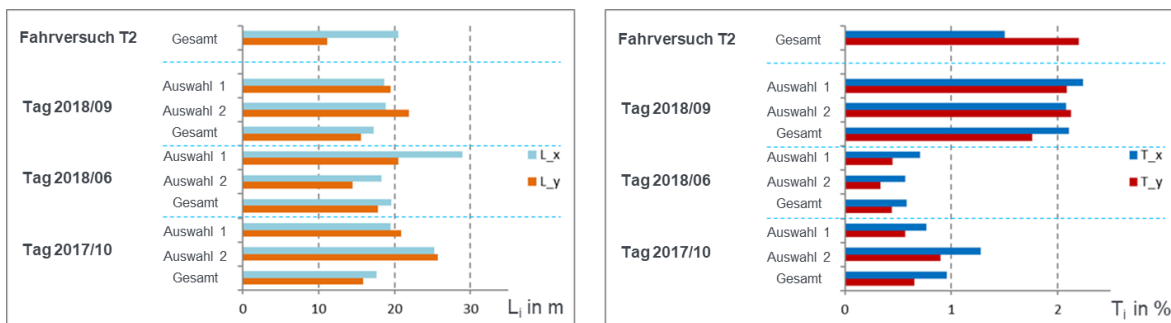


**Abbildung 3.13** Anströmsituation: Mittelwert und Standardabweichung des Anströmwinkels  $\beta$  unterschiedlicher Fahrversuche

Aus den gemittelten Turbulenzgrößen in **Abbildung 3.14** kann erkannt werden, dass die verschiedenen Fahrversuchen vergleichbare Längenskalen aufweisen, wohingegen die Werte der turbulenten Intensitäten stark variieren. Diese zeigen eine direkte Korrelation mit der Varianz des Anströmwinkels  $\sigma^2(\beta)$ , sodass eine höhere Standard-

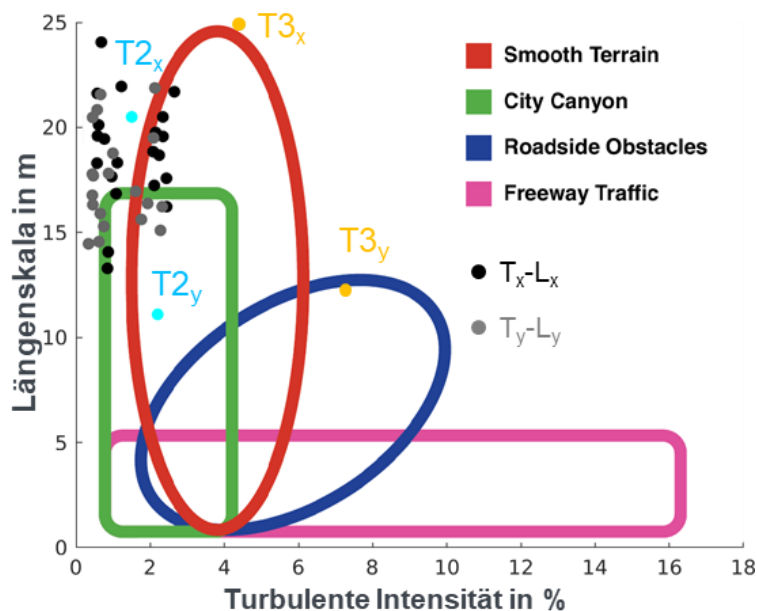
abweichung des Anströmwinkels mit einer höheren Fluktuation der Geschwindigkeitskomponenten der Anströmung zusammenhängt und somit auf einen entsprechenden Energiegehalt der Anströmung hindeutet.

Zur Vergleichbarkeit der Fahrversuchsergebnisse sind die turbulenten Größen aus dem *Fahrversuch T2* mit dem MAN-TGA auch in **Abbildung 3.14** dargestellt. Diese weisen eine vergleichsweise moderate Anströmsituation, wobei die turbulente Intensität der Querkomponente der Anströmung aufgrund der großen  $\sigma(\beta)$  eine höhere enthaltene Energie aufweisen.



**Abbildung 3.14** Gemittelte turbulente Größen aus den Fahrversuchen

Analog zur Analyse der Fahrversuche von IPW Automotive kann die Anströmung der Fahrversuche mit den MAN-TGX anhand der von Wordley und Saunders definierten  $L_i$ - $T_i$ -Bereiche charakterisiert werden.

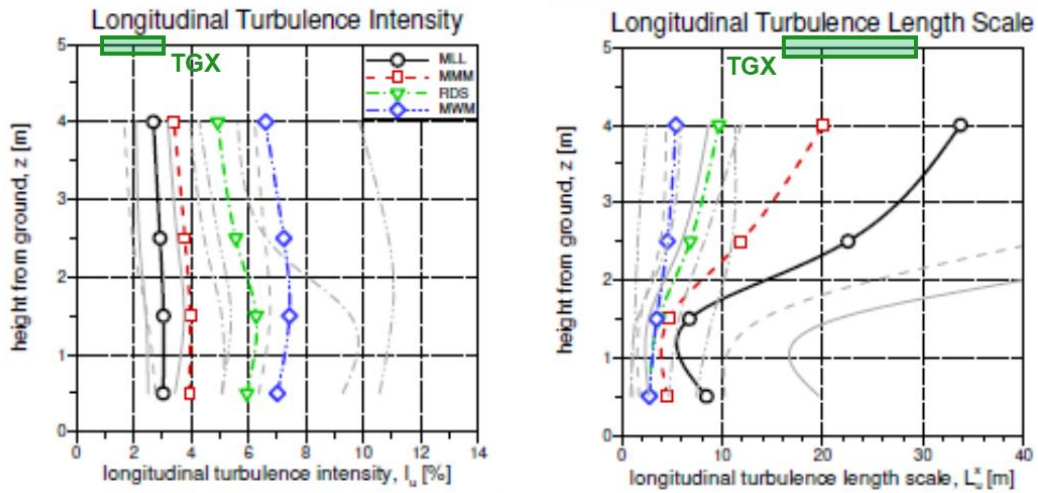


**Abbildung 3.15** Charakterisierung der turbulenten Anströmsituation im Fahrversuch

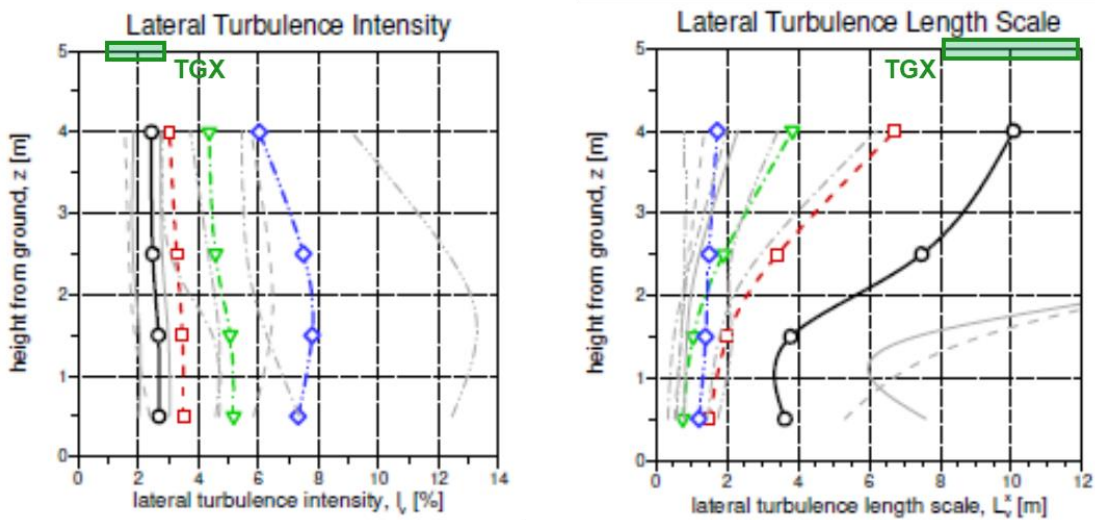




Durch die **Abbildung 3.15** lassen sich die von MAN durchgeführten Fahrversuche aufgrund ihrer niedrigen turbulenten Intensität und gleichzeitig vergleichbar großen Längenskalen als „Smooth Terrain“ sowie als „City Canyon“ kennzeichnen. Der Grund hierfür liegt in der Entwicklung der turbulenten Eigenschaften der Anströmung über der Höhe, sodass auf der Höhe des angebrachten Anemometers bei moderaten Windverhältnissen kleinere turbulente Intensitäten zu erwarten sind. Derartige Schlussfolgerungen können unter Zuhilfenahme der Straßenmessungen des NRCC [13, 14] entzogen werden. Wie in **Abbildung 3.16** und **Abbildung 3.17** zu sehen ist, verhält sich die Längenskala mit der Höhe entgegengesetzt zur turbulenten Intensität. Hierbei ist die Streubreite der Ergebnisse mit dem MAN-TGX mit den Kurven „MLL“ und „MMM“, welche für niedrige und moderate Umwelteinflüsse stehen, zu vergleichen. Allerdings beträgt die maximale Höhe der vom NRCC aufgezeichneten Straßenmessungen 4 m über der Fahrbahn, wie in den Abbildungen zu erkennen ist. Trotz des nicht abgedeckten Bereichs auf Anemometerhöhe (ca. 5,5 m) lässt sich anhand der dargestellten Kurvenentwicklung festzustellen, dass die Streubreite der hier analysierten Fahrversuchsergebnisse charakterisierbar und konsistent mit den Untersuchungen des NRCC sind.



**Abbildung 3.16** Turbulente Intensität und Längenmaß der longitudinalen Komponente der Anströmung über der Höhe nach [13, 14] und Streubreite des TGX-Fahrversuchs



**Abbildung 3.17** Turbulente Intensität und Längenmaß der Querkomponente der Anströmung über der Höhe nach [13, 14] und Streubreite des TGX-Fahrversuchs

## 4 Modellierung des natürlichen Windverhaltens

Der Einfluss der vom Windverhalten ausgeprägten instationären Anströmung auf die Aerodynamik eines Nutzfahrzeugs wird in dieser Arbeit mit Hilfe der numerischen Strömungsberechnung untersucht. Zur Erzeugung einer zeitabhängigen turbulenten Einlassbedingung, die die Anströmsituation im Fahrversuch abbildet, werden im Verlauf der vorliegenden Arbeit vier Ansätze verfolgt. Diese werden im nachfolgenden Kapitel vorgestellt.

### 4.1 Modellierung anhand der im Fahrversuch aufgenommenen Messdaten

Dieses Verfahren zur Modellierung der instationären Anströmung in der numerischen Strömungssimulation beruht auf der Annahme, dass durch das Anemometer im Fahrversuch aufgenommenen Strömungsgrößen als eine repräsentative Darstellung der Anströmbedingungen betrachtet und somit als Anströmrandbedingungen vorgegeben werden können.

Die Beschreibung der Anströmung in der numerischen Strömungssimulation erfolgt entsprechend über ein aus dem Fahrversuch erzeugtes Messsignal, wohingegen ein beliebig aufgezeichnetes Messsignal nicht direkt als Randbedingung verwendet werden kann. Die durch den Fahrversuch vorhandene Messsignale werden an erster Stelle anhand einer Messsignalanalyse bearbeitet. Anschließend werden repräsentative Messfenster ausfindig gemacht und ausgewählt, welche die Windverhältnisse und die Strömungssituation des entsprechenden Fahrversuchs korrekt wiedergeben. Ein charakteristisches Messsignal wird folgendermaßen definiert:

1. Das Messsignal des Anemometers wird mittels Messsignalanalyse bearbeitet und tiefpassgefiltert.
2. Unter Berücksichtigung der charakteristischen Strömungssituation im gesamten Fahrversuch (Messtag) wird ein repräsentatives Messfenster ausgewählt.
3. Das ausgewählte Messfenster wird nach den durchschnittlichen Werten der Strömungsgrößen des Messtages skaliert.

Aufgrund der Datenmenge ist es erforderlich, dass das Vorgehen zur Definition eines charakteristischen Messsignals automatisiert durchgeführt wird. Infolgedessen wurden die Algorithmen zur Bearbeitung und Suche des Messsignals vollständig in MATLAB® implementiert.

Das vorgestellte Verfahren erzeugt anhand von vorhandenen Fahrversuchsmessdaten charakteristische Messsignale, welche in der Strömungssimulation als Randbedingung vorgegeben werden und es ermöglichen, eine nicht homogene und anisotrope Anströmung abzubilden. Allerdings bezieht sich die festgelegte Anströmrandbedingung auf ein Signal, welches an nur einem Punkt im Strömungsfeld aufgezeichnet wurde, sodass das Fahrzeug in der Strömungssimulation eine planar behaftete Anströmung erfährt, während in einer realen Anströmung auch räumliche Eigenschaften vorhanden sind. Zudem erfordert dieser Ansatz die Anwendung von erfassten Messergebnissen und nicht nur die Kenntnisse über die durchschnittlichen Strömungs- und Turbulenzmerkmale. Daher muss der Aufwand zur Durchführung der Fahrversuche berücksichtigt werden.

## 4.2 Die Mann-Methode

Der oben angeführte Ansatz zur Charakterisierung und Abbildung der Anström-situation im Fahrversuch bezieht sich auf eine durch das Anemometer aufgezeichnete Messung der Strömungsgrößen, sodass die vorgegebene Anströmung ein zeitlich veränderliches homogenes Geschwindigkeitsprofil darstellt. Die instationäre Natur der Anströmung wird dabei abgebildet, allerdings werden die räumlichen Fluktuationen der Windgeschwindigkeit vernachlässigt.

Die Mann-Methode, die ihren Ursprung im Windingenieurswesen hat, ermöglicht die Abbildung der turbulenten Geschwindigkeits-fluktuationen  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$  des natürlichen Windes [31, 32]. Die bisherigen Einsatzbereiche der Methode sind die Berechnung der Windbelastung von Brücken und Windrädern [33] sowie die Berechnung der turbulenten Einlassbedingung im Kontext der numerischen Strömungssimulation.

Um die erwarteten Anströmbedingungen zu gewährleisten, stellt die Mann-Methode drei verstellbare Parametergrößen zur Verfügung:

- Die erwartete turbulente Länge  $L_{Mann}$ , welche die Wirbelgröße beschreibt.
- Die Dissipation der turbulenten kinetischen Energie  $\alpha \varepsilon^{\frac{2}{3}}$ .
- Der Parameter  $\Gamma$ , welcher die Anisotropie der Strömung kontrolliert.

Zur Berechnung der drei Geschwindigkeitsfluktuationen in einem dreidimensionalen Feld sind folgende Schritte erforderlich:

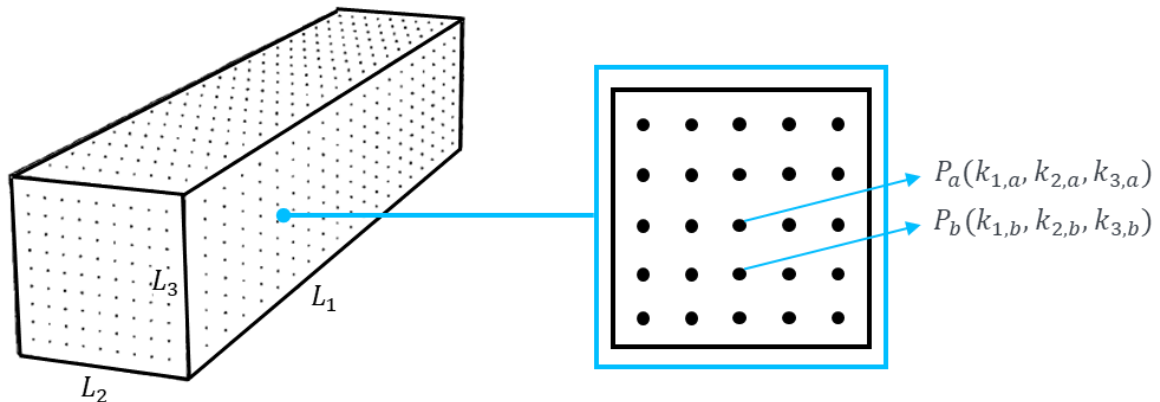
**Berechnung des spektralen Tensors und der Fourier Koeffizienten  $C_{ij}(k)$**

Der spektrale Tensor ist der zentrale Bestandteil der Mann-Methode. Er beinhaltet die räumlichen Kovarianzen der Geschwindigkeitsfluktuationen  $(u', v', w')$ . Dies bedeutet, dass er angibt, inwieweit eine Geschwindigkeitskomponente eines Punkts  $P_a$  im Strömungsfeld mit derselben Komponente an einem angrenzenden Punkt  $P_b$  korreliert, siehe **Abbildung 4.1**.

Da die mathematischen Operationen dieser Methode im Frequenzbereich durchgeführt werden, wird der spektrale Tensor im Wellenzahlbereich dargestellt. Der Wellenzahlbereich, über dem der spektrale Tensor aufgespannt wird, kann nach Gleichung (4.1) definiert werden.

$$k_i = m_i \frac{2\pi}{L_{D,i}} \tag{4.1}$$

Mit  $m_i = -\frac{N_i}{2}, \dots, \frac{N_i}{2}$  und  $i = (1,2,3)$ . Hier stellen  $L_{D,i}$  die Abmessung der berechneten Domain und  $N_i$  die Anzahl an Punkten entlang der jeweiligen Raumrichtung dar.



**Abbildung 4.1** Größe und Auflösung der berechneten Domain der Mann-Methode [32]

Trotz der hier eingeführten Betrachtung der Domaingröße und deren Diskretisierung im Wellenzahlbereich, werden diese später über eine Fouriertransformation in eine räumliche Darstellung überführt. Um den physikalischen Zusammenhang beibehalten zu können, kann an dieser Stelle erwähnt werden, dass die Dimensionen  $L_2$  und  $L_3$  jeweils die Breite und die Höhe des berechneten Strömungsfelds darstellen. Demnach entspricht  $L_1$  der zeitlichen Entwicklung, sodass die Anzahl an Punkten  $N_1$  als die Anzahl der Zeitschritte betrachtet werden kann. Bei einer gewünschten Simulations-

dauer  $t_{sim}$  und einer zeitlichen Auflösung  $f_{Einlass}$ , ergibt sich die notwendige Anzahl an Punkten  $N_1$  entsprechend der Gleichung (4.2).

$$N_1 = t_{sim} \cdot f_{Einlass} \quad (4.2)$$

Im Weiteren werden die Wellenzahlvektoren  $k_i$  jeweils zu einem räumlichen Gitter der Größe  $N_1, N_2, N_3$  aufgespannt. Die Terme des symmetrischen spektralen Tensors  $\Phi_{ij}(k)$  lassen sich folgendermaßen berechnen:

$$\Phi_{11}(k) = \frac{E(k_0)}{4\pi k_0^4} (k_0^2 - k_1^2 - 2k_1 k_{30} \zeta_1 + (k_1^2 + k_2^2) \zeta_1^2) \quad (4.3)$$

$$\Phi_{22}(k) = \frac{E(k_0)}{4\pi k_0^4} (k_0^2 - k_2^2 - 2k_2 k_{30} \zeta_2 + (k_1^2 + k_2^2) \zeta_2^2) \quad (4.4)$$

$$\Phi_{33}(k) = \frac{E(k_0)}{4\pi k^4} (k_1^2 + k_2^2) \quad (4.5)$$

$$\Phi_{12}(k) = \frac{E(k_0)}{4\pi k_0^4} (-k_1 k_2 - k_1 k_{30} \zeta_2 - k_2 k_{30} \zeta_1 + (k_1^2 + k_2^2) \zeta_1 \zeta_2) \quad (4.6)$$

$$\Phi_{13}(k) = \frac{E(k_0)}{4\pi k_0^2 k^2} (-k_1 k_{30} + (k_1^2 + k_2^2) \zeta_1) \quad (4.7)$$

$$\Phi_{23}(k) = \frac{E(k_0)}{4\pi k_0^2 k^2} (-k_2 k_{30} + (k_1^2 + k_2^2) \zeta_2) \quad (4.8)$$

Wie in den obigen Gleichungen zu erkennen ist, ist den Einträge des Tensors das von-Kármán-Energiespektrum nach Gleichung (4.9) zugrunde gelegt.

$$E(k) = \alpha \varepsilon^{\frac{2}{3}} L^{\frac{5}{3}} M_{ann} \frac{(L_{Mann} \cdot k)^4}{(1 + (L_{Mann} \cdot k)^2)^{\frac{17}{6}}} \quad (4.9)$$

Die Wellenzahlräume  $k$  und  $k_0$  berechnen sich entsprechend der Gleichungen (4.10) und (4.11). In diesem Zusammenhang kann der Wellenraum  $k_0$  als Anfangsbedingung verstanden werden, wobei  $k_{30} = k_3 + \beta_{Mann} k_1$  gilt.

$$k = \sqrt{k_1^2 + k_2^2 + k_3^2} \quad (4.10)$$

$$k_0 = \sqrt{k_1^2 + k_2^2 + k_{30}^2} \quad (4.11)$$

Zudem berücksichtigen die Größen  $\zeta_1$  und  $\zeta_2$  die Wirbellebensdauer, welche mithilfe der „rapid distortion theory“ festgelegt werden kann [33]. Die Größen  $\zeta_1$  und  $\zeta_2$  können über folgende Gleichungen berechnet werden:

$$\zeta_1 = C_1 - \frac{k_2}{k_1} C_2 \quad (4.12)$$

$$\zeta_2 = \frac{k_2}{k_1} C_1 + C_2 \quad (4.13)$$

$$C_1 = \frac{\beta_{Mann} k_1^2 (k_0^2 - 2k_{30}^2 + \beta k_1 k_{30})}{k^2 (k_1^2 + k_2^2)} \quad (4.14)$$

$$C_2 = \frac{k_2 k_0^2}{(k_1^2 + k_2^2)^{\frac{3}{2}}} \arctan \left( \frac{\beta_{Mann} k_1 (k_1^2 + k_2^2)^{\frac{1}{2}}}{k_0^2 - k_{30} k_1 \beta_{Mann}} \right) \quad (4.15)$$

Die dimensionslose Zeit ist als Produkt aus Scherung und Zeit definiert:  $\beta_{Mann} = \frac{dU}{dz} t$ .

Zur Bildung eines stationären Modells wird die Zeit  $t$  durch die Wirbellebensdauer ersetzt. Diese ist definiert als:

$$\tau_{Wirbel}(k) = \Gamma \left( \frac{dU}{dz} \right)^{-1} (k L_{Mann})^{-\frac{2}{3}} \left( {}_2F_1 \left( \frac{1}{3}, \frac{17}{6}; \frac{4}{3}; -(k L_{Mann})^{-2} \right) \right)^{-\frac{1}{2}} \quad (4.16)$$

mit der Hypergeometrischen Funktion  ${}_2F_1$ .

Nach Bildung des spektralen Tensors können die Fourier Koeffizienten  $C_{ij}(k)$  über die Gleichung (4.17) berechnet werden.

$$C_{ij}(k) = \frac{(2\pi)^{\frac{3}{2}}}{V(B)^{\frac{1}{2}}} A_{ij}(k) \quad (4.17)$$

Dabei ist  $V(B) = L_{D,1} L_{D,2} L_{D,3}$  das Volumen der berechneten Domain. Die Koeffizienten  $A_{ij}(k)$  können über  $A_{ik}^* A_{jk} = \Phi_{ij}$  bestimmt werden. Dies bedeutet,  $A_{ij}(k)$  entspricht der Quadratwurzel von  $\Phi_{ij}(k)$ .

### Betrachtung einer Gaußschen Normalverteilung $n_j(k)$

Zur Berücksichtigung des natürlichen Windverhaltens wird in der Mann-Methode angenommen, dass die berechneten Fluktuationen eine Gaußverteilung darstellen.

Um dieses Verhalten modellieren zu können, wird eine normalverteilte komplexe Zufallsvariable  $n_j(k)$  generiert. Diese besitzt den Mittelwert null und die Standardabweichung eins.

### Fourier-Transformation der Terme

Zuletzt werden die berechneten Fourier-Koeffizienten mit der Gaußschen Normalverteilung multipliziert. Anschließend wird das dreidimensionale Geschwindigkeitsfluktationsfeld  $u'_i(x)$  über eine Fouriertransformation in eine räumliche Darstellung überführt.

$$u'_i(x) = \sum_k e^{ikx} C_{ij}(k) n_j(k) \quad (4.18)$$

Dabei sind die drei Komponenten der Geschwindigkeitsfluktuation  $u'$ ,  $v'$ ,  $w'$  in  $u'_i(x)$  enthalten.

Durch die von der Mann-Methode vorgesehene Berechnung der Kovarianzen, die Betrachtung der von-Kármán-Spektren sowie die Überlagerung einer Gaußverteilung entsteht eine stochastische Verteilung der berechneten Geschwindigkeitsfluktuationen und somit auch der entsprechenden turbulenten Intensität und der Längenskalen. Dies bedeutet, dass das anhand der Mann-Methode berechnete Fluktationsfeld die Merkmale des natürlichen Winds besitzt, indem es ein kohärentes, inhomogenes und anisotropes Verhalten abbildet. Das hierbei erzeugte Fluktationsfeld wird einer konkreten Anströmsituation, beispielsweise einer frontalen Anströmung, überlagert. Dabei entsteht aufgrund des fluktuierenden Anteils eine Strömung, die als instationär und räumlich veränderlich betrachtet werden kann.

Die Mann-Methode wurde vollständig in MATLAB® implementiert um die im Kapitel 3.3 vorgestellten Anströmungssituationen des Fahrversuchs in der Strömungssimulation abzubilden. Weitere Aspekte zur Anwendung dieses Verfahrens sowie zur Erzeugung von instationären Anströmrandbedingungen werden im Kapitel 5.2.2 erläutert.

## 4.3 Hybrides Verfahren

In der vorliegenden Arbeit wird unter hybridem Verfahren die Kombination von den beiden oben vorgestellten Ansätzen zur Abbildung des instationären Windverhaltens mit dem Ziel verstanden, den Einfluss der Verfahrensschwächen beider Ansätze zu minimieren. Das bedeutet, dass zur Definition des hybriden Verfahrens die berechneten Geschwindigkeitsfluktuationen der Mann-Methode eines



charakteristischen Messsignals überlagert werden. Auf diese Weise wird die Anströmung anhand eines charakteristischen Messsignals, welches bezüglich ihres planar behafteten Verhaltens als vereinfacht gilt, mit räumlichen Geschwindigkeitsfluktuationen versehen. Entsprechend wird das Fluktuationfeld der Mann-Methode, wie oben genannt, keiner konkreten stationären Anströmung, sondern einer realitätsnäheren Anströmung überlagert.

Analog zu den ursprünglichen Ansätzen müssen beim hybriden Verfahren sowohl die zeitlichen Messsignale vom Fahrversuch als auch deren turbulente Charakterisierung zur Verfügung stehen. Im Laufe der vorliegenden Arbeit werden die bereits vorhandenen charakteristischen Messsignale und die generierten Fluktuationfelder der Mann-Methode zur Definition der Randbedingungen in der Strömungssimulation kombiniert.

Folglich ermöglicht es die Anwendung des hybriden Verfahrens, eine nicht homogene und anisotrope Anströmung in der Strömungssimulation abzubilden. Dabei zeigt sich als besonders vorteilhaft, dass die vorgegebene Anströmung bekannt und analysierbar ist. Zudem kann deren direkten Kombination zu lokalen Überschätzungen der vorgegebenen Geschwindigkeit in der Simulationsdomain führen, da die Anströmbedingungen der Verfahren getrennt voneinander definiert worden sind.

Weitere Erläuterungen zur Anwendung des hybriden Verfahrens sind im Kapitel 5.2.3 zu finden.

#### 4.4 Die „Upstream Turbulence“-Funktion des PowerFLOW®

Der Präprozessor des Softwarepakets PowerFLOW® bietet die Möglichkeit, instationäre Randbedingungen am Einlass des Berechnungsgebiets vorzugeben. Damit können Untersuchungen der Fahrzeugaerodynamik unter instationären Anströmbedingungen durchgeführt werden [34].

Die „Upstream Turbulence“-Funktion ermöglicht es, Geschwindigkeits-Zeitsignale einzulesen oder ein hinterlegtes Standardsignal bei der Simulation zu verwenden. Die graphische Oberfläche dieser Funktion ist in **Abbildung A.1** dargestellt.

Durch Auswahl des Standardsignals und Einstellung der erwarteten turbulenten Intensitäten und Längenskalen wird ein dreidimensionales Geschwindigkeitsfluktuationfeld am Einlass erzeugt.

Durch die jeweilige Einstellung der turbulenten Intensität entlang der drei Raumrichtungen kann ein anisotropes Strömungsfeld erzeugt werden. Dabei wird über den Betrag der Intensität die Amplitude des vorgegebenen Signals skaliert. Die Festlegung

einer turbulenten Länge bewirkt ein Skalieren des hinterlegten Signals entlang der Zeit. Zudem werden das aus den erzeugten turbulenten Fluktuationen berechnete Leistungsdichtespektrum und die Geschwindigkeitsfluktuationen über die Zeit dargestellt [34, 35].

Eine tieferegehende Dokumentation der „Upstream Turbulence“-Funktion ist nicht vorhanden. Es ist unklar, welche Eigenschaften und welche Topologie beziehungsweise welche räumliche Verteilung das hinterlegte Standardsignal besitzt und wie es erzeugt wurde. Außerdem ist nicht klar, wie das Geschwindigkeitsfeld am Einlass berechnet wird. Zusätzlich und im Gegensatz zu den oben vorgestellten Verfahren sind die mit der „Upstream Turbulence“-Funktion generierten Anströmbedingungen im Vorfeld nicht bekannt. Diese werden erst im Laufe der Strömungssimulation erzeugt.

Weitere Informationen zur Erzeugung der instationären Einlassbedingungen mit diesem Verfahren sind im Kapitel 5.2.4 zu finden.

## 5 Erzeugung der Anströmbedingungen

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Untersuchung des Einflusses der instationären Anströmung auf die Fahrzeugaerodynamik. Dazu wird als Grundlage zunächst das aerodynamische Verhalten des Nutzfahrzeugs unter stationären Windbedingungen betrachtet. Anschließend wird das Nutzfahrzeug instationären Windverhältnissen ausgesetzt. In diesem Kapitel werden die stationären und instationären Anströmrandbedingungen der numerischen Strömungssimulation erarbeitet und bewertet.

### 5.1 Stationäre Windverhältnisse

Die Untersuchung der stationären Windverhältnisse erzielt den Aufbau eines besseren Verständnisses über den Einfluss einer Schräganströmung auf die Fahrzeugaerodynamik. Ebenfalls dienen die dabei entstehenden Erkenntnisse als Referenz für den Vergleich mit der instationären Anströmung.

Die Definition der Randbedingungen zur Abbildung eines stationären Seitenwinds in der Strömungssimulation basiert auf der Strömungssituation im Fahrversuch. Hierfür wurden die durchschnittlichen Werte der Strömungsgrößen der Fahrversuche von IPW Automotive in Betracht gezogen, welche im Kapitel 3.3.1 analysiert wurden.

Eine Fahrzeuggeschwindigkeit  $\bar{v}_{Fzg}$  von 87,2 km/h, welche der im Fahrversuch durchschnittlichen Fahrgeschwindigkeit entspricht, wurde festgelegt. Ebenso wurde die durchschnittliche Windstärke  $\bar{v}_{Wind}$  mithilfe der Auswertung der Windsituation beider Fahrversuchstage ermittelt.

$$\bar{v}_{Wind} = \frac{\bar{v}_{Wind,T2} + \bar{v}_{Wind,T3}}{2} \quad (5.1)$$

Nach Gleichung (5.1) beträgt die durchschnittliche Windstärke im Fahrversuch 2,9 m/s. Dieser Wert ist mit den vorherrschenden Windgeschwindigkeiten in Europa vergleichbar, welche sich aus der Literatur entnehmen lassen [36].

Neben der mittleren Fahr- und Windgeschwindigkeit ist bei der Definition der Anströmsituation ebenfalls die Windrichtung von entscheidender Bedeutung. Die im Kapitel 3.3 vorgestellten Fahrversuchsergebnisse zeigen, dass die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion des Anströmwinkels  $\beta$  einer Normalverteilung folgt, sodass dieser außerhalb eines bestimmten Bereichs nur mit geringer Wahrscheinlichkeit auftritt. In Anlehnung an die Untersuchungen unter Einfluss des Seitenwinds in [22] wird ein für Nutzfahrzeuge repräsentativer Anströmwinkelbereich von  $[0^\circ, 3^\circ]$  berücksichtigt. Die

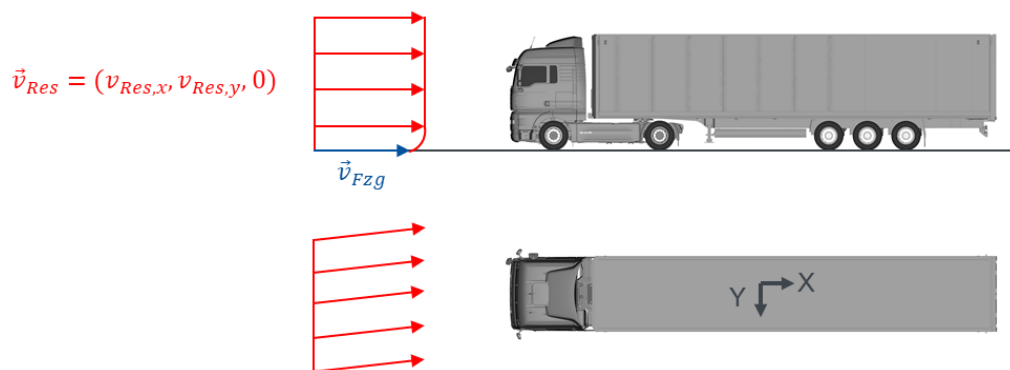
Windrichtung, der Anströmwinkel und die auf das Fahrzeug wirkenden Geschwindigkeitskomponenten lassen sich anhand der trigonometrischen Beziehungen in Abbildung 2.1 herleiten und sind in **Tabelle 5.1** dargestellt. Letztlich wird die Abstufung der Anströmwinkel nach [22] gewählt.

**Tabelle 5.1** Stationäre Anströmrandbedingungen

Windrichtung $\alpha$ in °	Anströmwinkel $\beta$ in °	Resultierende Geschwindigkeit $v_{Res,x}$ in m/s	Resultierende Geschwindigkeit $v_{Res,y}$ in m/s
0	0	27,10	0
~9	1	27,06	-0,45
~29	3	26,73	-1,40

Den in **Tabelle 5.1** dargestellten resultierenden Geschwindigkeitskomponenten kann entnommen werden, dass bei einer idealen Frontalanströmung ( $\beta = 0^\circ$ ) die mittlere Windstärke  $\bar{v}_{Wind}$  der Fahrzeuggeschwindigkeit  $\bar{v}_{Fzg}$  addiert wird. Eine Zunahme der Windrichtung  $\alpha$  bedeutet, entsprechend des Anströmwinkels  $\beta$ , die Entstehung der seitlichen Anströmkomponente.

Die oben angegebenen Komponenten der resultierenden Geschwindigkeit werden über den gesamten Einlass in der Simulationsdomain vorgegeben, sodass sich dort eine konstante Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt ergibt (**Abbildung 5.1**). Nach [22] ist das asymmetrische Verhalten von Nutzfahrzeugkonfigurationen unter Einfluss des Seitenwinds bekannt. Dies wird in der vorliegenden Arbeit allerdings nicht explizit untersucht. Die Untersuchung der Schräganströmung soll dazu dienen, ein besseres Verständnis des Einflusses einer stationären seitlichen Anströmung aufzubauen sowie Referenzwerte für den Vergleich mit der instationären Anströmung festzulegen.



**Abbildung 5.1** Randbedingungen unter einer stationären Schräganströmung

## 5.2 Instationäre Windverhältnisse

Zur Erzeugung instationärer Einlassbedingungen werden im Rahmen dieser Arbeit vier unterschiedliche Verfahren verwendet. Diese lassen sich, wie in Kapitel 4 erläutert wurde, anhand deren zugrunde liegenden Ansätze zur Modellierung der Windverhältnisse in drei verschiedenen Kategorien unterteilen. Es werden Randbedingungen erzeugt, die zum einen direkt auf einem aus dem Fahrversuch erfassten Messsignal basieren und zum anderen mithilfe berechneter Fluktuationfelder die Windverhältnisse abbilden. Zuletzt werden die genannten Ansätze kombiniert, um hybride Randbedingungen zu erzeugen, die die Eigenschaften der ursprünglichen Verfahren synergetisch nutzen.

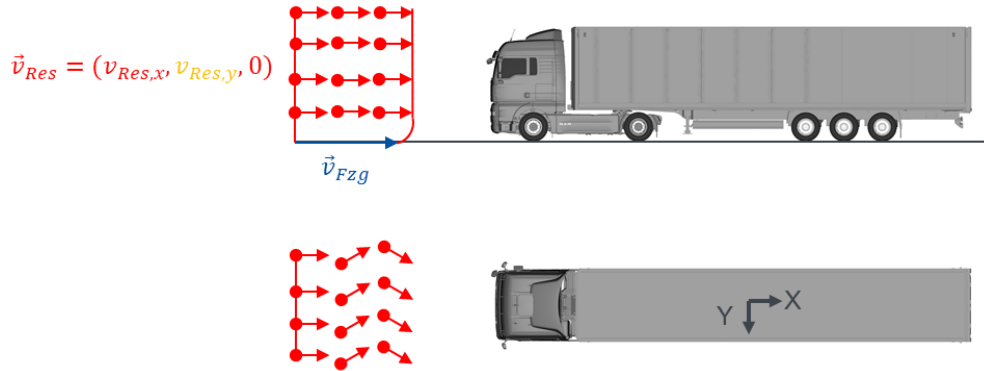
Um genaue Kenntnisse über die Prognosegüte und Sensitivität der verwendeten Verfahren zur Abbildung der instationären Anströmung in der Strömungssimulation zu erzielen, werden jeweils zwei unterschiedliche Strömungssituationen untersucht. Zu diesem Zweck einigen sich die in Kapitel 3.3.1 analysierten Fahrversuche von IPW Automotive besonders gut. Grund dafür sind die deutlich unterschiedlichen Windverhältnisse an den Messtagen, unter welchen die Fahrversuche stattfanden. Ebenfalls wird zur Vergleichbarkeit mit dem Messzeitfenster im Fahrversuch, welches zur Überquerung einer Sektion notwendig ist, eine Dauer der Simulation und der entsprechenden vorgegebenen Randbedingung von 8 s in Betracht gezogen.

### 5.2.1 Charakteristische Messsignale aus dem Fahrversuch

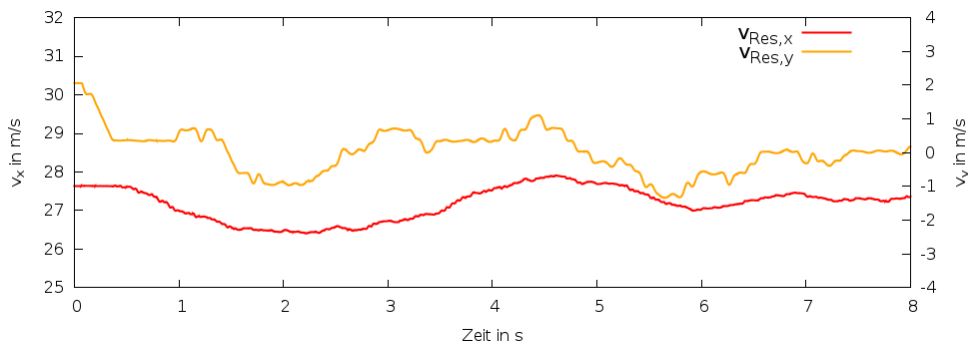
Durch die in Kapitel 4.1 vorgestellte Vorgehensweise zur Modellierung instationärer Windverhältnisse über ein aus dem Fahrversuch erfasstes Messsignal, lassen sich die durch das Anemometer aufgenommenen Messdaten der Strömungsgrößen bearbeiten und repräsentative Messfenster können gewählt werden. Das resultierende charakteristische Messsignal wird in Form eines zeitabhängigen Geschwindigkeitsvektors dargestellt, der vom Strömungslöser eingelesen werden kann. Zur Definition der Anströmrandbedingung werden, wie in **Abbildung 5.2** skizziert, die longitudinalen und lateralen Geschwindigkeitskomponenten über den gesamten Einlass in der Simulationsdomain entsprechend vorgegeben, sodass sich dort eine zeitabhängige homogene Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt ergibt.

**Abbildung 5.3** und **Abbildung 5.4** stellen die charakteristischen Messsignale jeweils für die unterschiedlichen Messstage der Fahrversuche von IPW Automotive dar, die als Randbedingungen im Strömungslöser vorgegeben werden. Diese wurden zur Analyse der Übertragungsqualität der Anströmung in der Strömungssimulation anhand Voruntersuchungen bei leerer Simulationsdomain untersucht. Es zeigte sich, dass das Übertragungsverhalten eine sehr gute Übereinstimmung für die vorgegebene

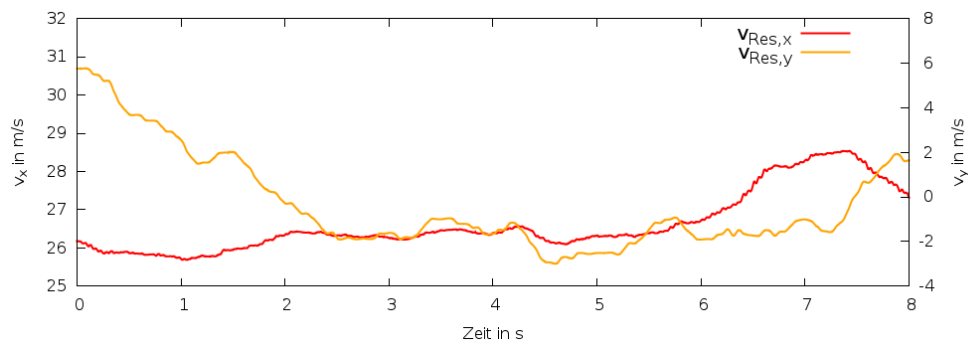
Anströmung aufweist (siehe Kapitel 6.2.2). Dies deutet daraufhin, dass die räumliche und zeitliche Diskretisierung für die Abbildung der Strömungsphänomene geeignet ist.



**Abbildung 5.2** Skizze der Randbedingung einer instationären Anströmung über ein aus dem Fahrversuch erfasstes Messsignal



**Abbildung 5.3** Zeitliche Entwicklung der Geschwindigkeitskomponenten zur Abbildung der Strömungssituation *Fahrversuch T2*



**Abbildung 5.4** Zeitliche Entwicklung der Geschwindigkeitskomponenten zur Abbildung der Strömungssituation *Fahrversuch T3*

## 5.2.2 Die Mann-Methode

Die Definition von Anströmrandbedingungen anhand der Mann-Methode erfolgt, wie im Kapitel 4.2 erläutert wurde, an erster Stelle mit der Berechnung der Geschwindigkeitsfluktuationfelder in MATLAB®. Anschließend lassen sich die berechneten Felder einer Anströmsituation im Strömungslöser überlagern. Das gesamte Vorgehen zur Erzeugung der Anströmrandbedingungen und entsprechend zur Abbildung des natürlichen Windes in der Strömungssimulation werden in diesem Absatz beschrieben.

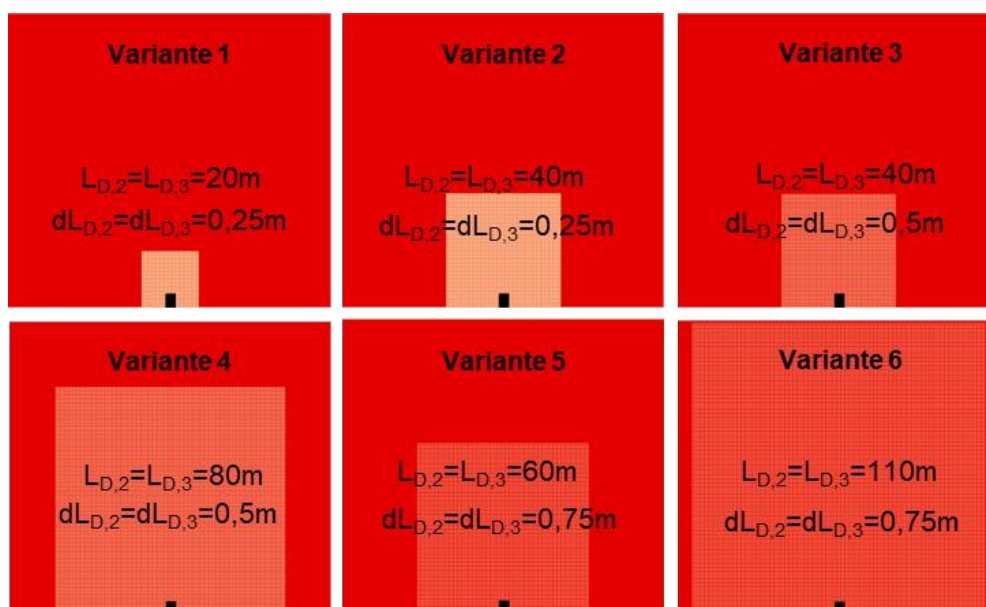
Die Mann-Methode berechnet einen Tensor, der die drei räumlichen turbulenten Geschwindigkeitsfluktuationen enthält. Wie **Abbildung 4.1** entnommen werden kann, ist dieser Tensor über dem diskreten dreidimensionalen Raum  $L_{D,1} \times L_{D,2} \times L_{D,3}$  aufgespannt. Die räumliche Abfolge der Ebenen  $L_{D,2} \times L_{D,3}$  entlang der Raumrichtung  $L_{D,1}$  kann unter Zuhilfenahme der Geschwindigkeit als zeitliche Abfolge interpretiert werden. Diese Ebenen ermöglichen somit die Darstellung einer transienten Randbedingung, welche nachträglich am Einlass des Simulationsgebiets im Strömungslöser vorgegeben werden kann.

Zur Beschreibung der physikalischen Eigenschaften der Fluktuationen sind drei Parameter erforderlich. Dabei handelt es sich um eine turbulente Länge, die Dissipation der turbulenten kinetischen Energie  $\alpha \varepsilon^{2/3}$  und schließlich ein Parameter  $\Gamma$ , der Auskunft über die Anisotropie der Fluktuationen gibt. Die Dissipation skaliert im Wesentlichen die Amplitude der Fluktuationen und daraus folgend die turbulente Intensität. Hierfür werden zur Definition der Eigenschaften der Fluktuationen die mittleren Turbulenzgrößen der Fahrversuche des IPW Automotive verwendet (aufgetragen in **Tabelle 3.2**).

Neben den physikalischen Parametern haben außerdem die geometrischen Eigenschaften des diskretisierten Raums einen Einfluss auf die Topologie der berechneten Anströmung. Es zeigt sich, dass die von der Mann-Methode abgebildeten turbulenten Längen stark vom diskretisierten Raum abhängen. Hierbei sind die Parameter der Diskretisierung die äußeren Abmaße  $L_{D,i}$  und die Anzahl an Punkten  $N_i$  entlang der drei Raumrichtungen.

Die räumliche Ausdehnung entlang der späteren Zeitachse  $L_{D,1}$  ergibt sich aus der vom Fahrzeug erfahrenen Anströmgeschwindigkeit  $\bar{v}_{Res}$  und der Simulationsdauer. Hierfür wird das Fluktuationfeld, wie in Kapitel 4.2 erläutert wurde, einer frontalen Anströmung überlagert, sodass die Anströmgeschwindigkeit 27,1m/s entspricht. Die Simulationsdauer beträgt zur Vergleichbarkeit mit dem Messzeitfenster im Fahrversuch 8 s. Letztlich wird die Diskretisierung entlang der  $L_{D,1}$  Achse zur hinreichenden Abbildung der für die Fahrzeugaerodynamik relevanten Strömungsphänomene bis 50Hz mit einer Nyquist-Frequenz von 100Hz aufgelöst.

Zur Untersuchung des Einflusses der Diskretisierung auf die abgebildeten turbulenten Längen sowie zur Definition der optimalen Diskretisierungsstrategie wurde eine Parameterstudie durchgeführt, bei der sowohl die Abmaße der Ebenen  $L_{D,2} \times L_{D,3}$  als auch deren Punkteanzahl  $N_2$  und  $N_3$  variiert wurden. In diesem Zusammenhang wurde angenommen, dass die Punkte der Diskretisierung äquidistant verteilt sind. Ebenso wurden die Größen  $L_{D,1}$  und  $N_1$  unverändert gehalten. In **Abbildung 5.5** sind ein Teil der untersuchten Varianten hinsichtlich ihrer Abmaße  $L_{D,i}$  und Auflösung  $dL_{D,i}$  zusammengefasst. Dabei stellt die schwarze Fläche die Nutzfahrzeuggröße zur Orientierung dar. Um die Abhängigkeit der abgebildeten turbulenten Längen von der Diskretisierung abschätzen zu können, wurden jeweils 100 Fluktuationfelder mit der Mann-Methode für jede Variante berechnet. Die über die Anzahl der Berechnungen und Diskretisierungspunkte gemittelten turbulenten Längen sowie deren maximalen Werte zeigten, dass nur die Abmaße  $L_{D,i}$  für die Größe der Längenskalen verantwortlich sind. Demnach müssen die Abmaße des Raums mindestens der doppelten angestrebten Längenskala entsprechen, um eine Wirbelgröße mit einer konkreten Längenskala im Raum abbilden zu können. Zudem deutet die Parameterstudie darauf hin, dass eine übermäßig grobe Auflösung  $dL_{D,i}$  die Abbildung von kleinskaligen Wirbeln beziehungsweise kleinen Skalenlängen beschränken kann. Andererseits führen hochaufgelöste Diskretisierungsstrategien zu einer Dateigröße, die Speicherprobleme beim Vorgeben der Randbedingung im Strömungslöser verursachen kann. Deshalb sollte eine Auflösung gewählt werden, die eine maximale Dateigröße von 1 GB nicht übersteigt.



**Abbildung 5.5** Parameterstudie für Diskretisierungsstrategien für die Mann-Methode

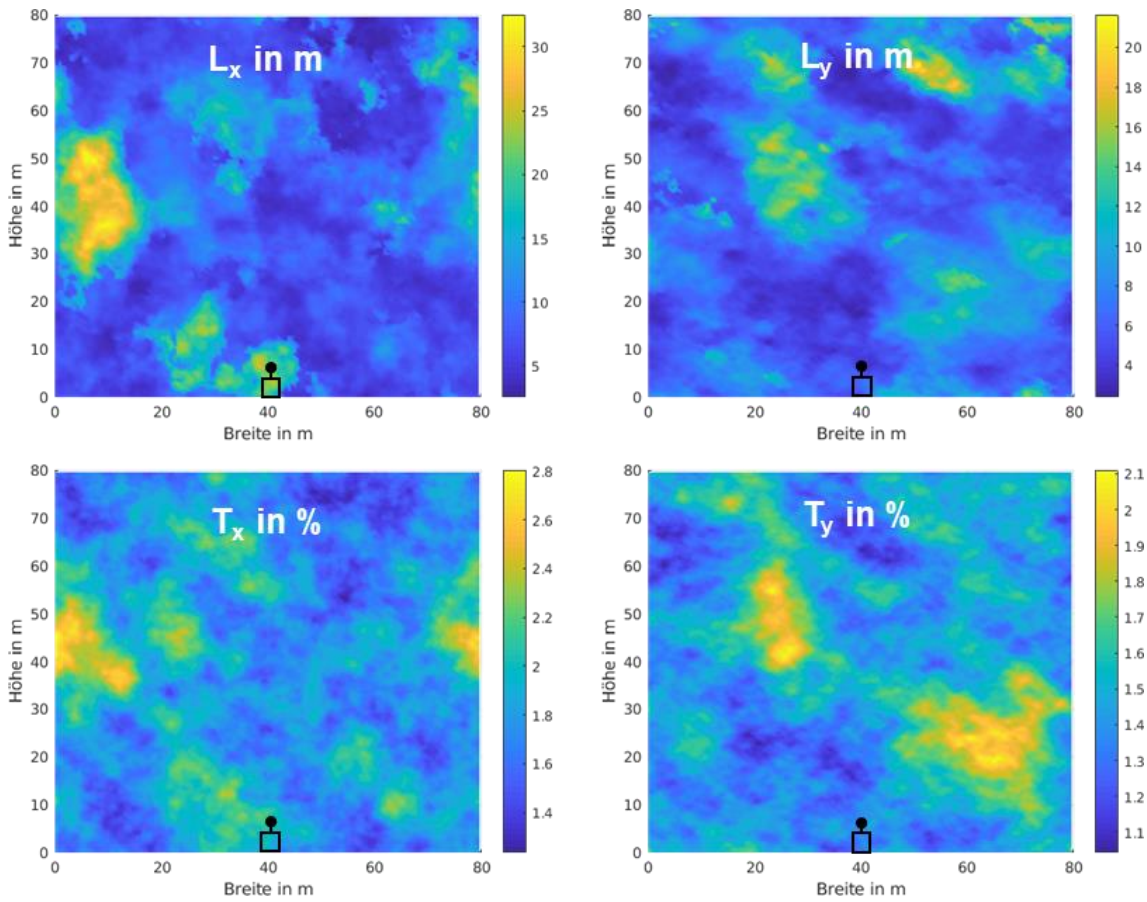




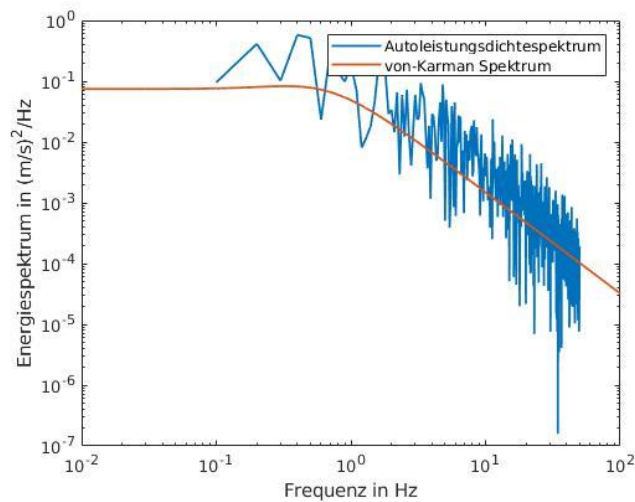
Aus den oben genannten Gründen wird im Laufe der vorliegenden Arbeit mit der Diskretisierungsstrategie der *Variante 4* gearbeitet. Diese ermöglicht das Auftreten von durchschnittlichen Längenskalen im Bereich von 15 m bis 30 m und deren Ränder sich weit genug vom Fahrzeug entfernt befinden. Außerdem lassen sich anhand der Auflösung von 0,5 m die für die Fahrzeugaerodynamik relevanten turbulenten Größen abbilden sowie der notwendige Arbeitsspeicher auf 800 MB begrenzen.

Da alle durch die Mann-Methode generierten Fluktuationfelder rein der Stochastik unterliegen, ändert sich die räumliche Verteilung der Fluktuationen in jedem Durchlauf. Es ändert sich also auch die zeitliche Topologie der berechneten Geschwindigkeiten in den einzelnen Punkten und somit auch die abgebildeten Turbulenzgrößen. Dies bedeutet, dass jedes generierte Fluktuationfeld einzigartig ist und sich die erwarteten Turbulenzgrößen nach **Tabelle 3.2** womöglich auf einer für das Anemometer relevanten Höhe von 5,35 m nicht ergeben werden. Um dies umgehen zu können, wurde die vorhandene Implementierung der Mann-Methode in MATLAB® mit einem Suchalgorithmus erweitert, der nur Durchläufe der Mann-Methode berücksichtigt, die auf Anemometerhöhe zu erwartende Turbulenzgrößen abbilden. Auf diese Weise kann die Vergleichbarkeit der erzeugten Randbedingung mit der im Fahrversuch erfassten Strömungssituation gewährleistet werden.

Die resultierende räumliche Verteilung der Turbulenzgrößen der Mann-Methode zur Darstellung der Strömungssituation *Fahrversuch T2* ist in **Abbildung 5.6** zu sehen. Dabei sind die Längenskala und die turbulente Intensität sowohl der longitudinalen als auch der Querkomponente der Anströmung für ein Zeitfenster von 8 s dargestellt. Aufgrund der Verwendung einer zufälligen Normalverteilung zur Berechnung der Geschwindigkeitsfluktuationen, kann sich für die beiden berechneten Anströmkomponenten ein lokaler Mittelwert ungleich Null ergeben. Das bedeutet, dass das zu untersuchende Nutzfahrzeug unter Umständen eine zeitlich betrachtet nicht homogene Anströmung erfahren kann. Dieser Effekt ist allerdings auch im Fahrversuch zu beobachten und hängt von der Dauer des berücksichtigten Zeitfensters ab.



**Abbildung 5.6** Längenskala und turbulente Intensität der longitudinalen (links) und lateralen (rechts) Anströmkomponenten zur Abbildung der Strömungssituation *Fahrversuch T2*



**Abbildung 5.7** Autoleistungsdichtespektrum der lateralen Anströmkomponente in einem beliebigen Punkt der Diskretisierung

Zuletzt lassen sich die Energiespektren der obigen Geschwindigkeitsfluktuationen analysieren und entsprechend mit den empirischen von-Kármán-Spektren nach Gleichung (2.21) vergleichen. Das in **Abbildung 5.7** dargestellte Autoleistungsdichtespektrum der lateralen Komponente der Geschwindigkeit weist eine gute Übereinstimmung mit den von-Kármán-Spektren auf. Es zeigt sich, dass das Energiespektrum über den gesamten Frequenzbereich gut abgebildet werden kann. Bei dem ausgewählten Diskretisierungspunkt übersteigt der berechnete Energiegehalt der niedrigen Frequenzen leicht das von-Kármán Spektrum.

In Analogie zu der oben vorgestellten Erzeugung der Fluktuationfelder wird die Strömungssituation des *Fahrversuchs T3* anhand der Mann-Methode abgebildet. Die räumliche Verteilung der Turbulenzgrößen ist in **Abbildung A.2** dargestellt.



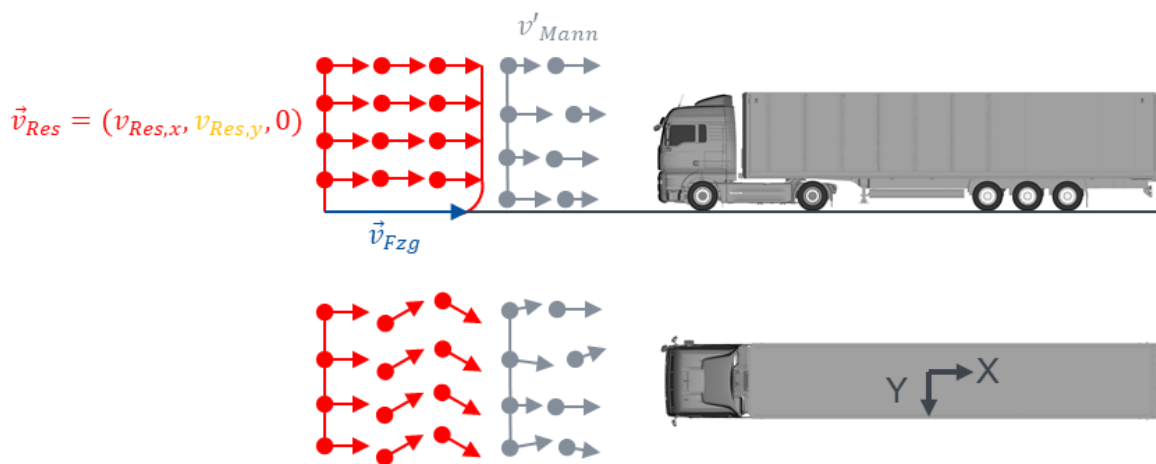
**Abbildung 5.8** Skizze der Randbedingung anhand der Mann-Methode

Die Definition der Anströmrandbedingung im Strömungslöser erfolgt durch die Überlagerung der mit der Mann-Methode erzeugten Fluktuationfelder, wie **Abbildung 5.8** zu entnehmen ist. Dafür bietet der verwendete Strömungslöser Simulia PowerFLOW® die Möglichkeit Geschwindigkeitsfluktuationen über eine Datei in tabellarischer Form einzulesen.

Die ausgewählte Diskretisierung für die Mann-Methode muss nicht mit der Diskretisierung in der späteren Strömungssimulation übereinstimmen. Allerdings müssen in dem Sinne beide, räumliche sowie zeitliche, Diskretisierung im Strömungslöser, wie in Kapitel 2.5.2 erläutert wurde, die Übertragung der vorgegebenen Strömungseigenschaften gewährleisten können. Deshalb werden, wie in **Abbildung 2.4** ersichtlich wird, die Verfeinerungsregionen bis zum Einlass verlängert. Die zeitliche Auflösung der Verfeinerungsregion 4, welche repräsentativ für die Anströmung des Fahrzeugs ist, beträgt 2350Hz und ist entsprechend größer als die verwendete Frequenz der instationären Randbedingung am Einlass. Somit können die vorgegebenen turbulenten Fluktuationen zeitlich ausreichend aufgelöst werden. Ebenso erlaubt die gewählte Voxelgröße (aufgetragen in **Tabelle 2.1**) die Übertragung und Abbildung der für die Fahrzeugaerodynamik relevanten turbulenten Skalen.

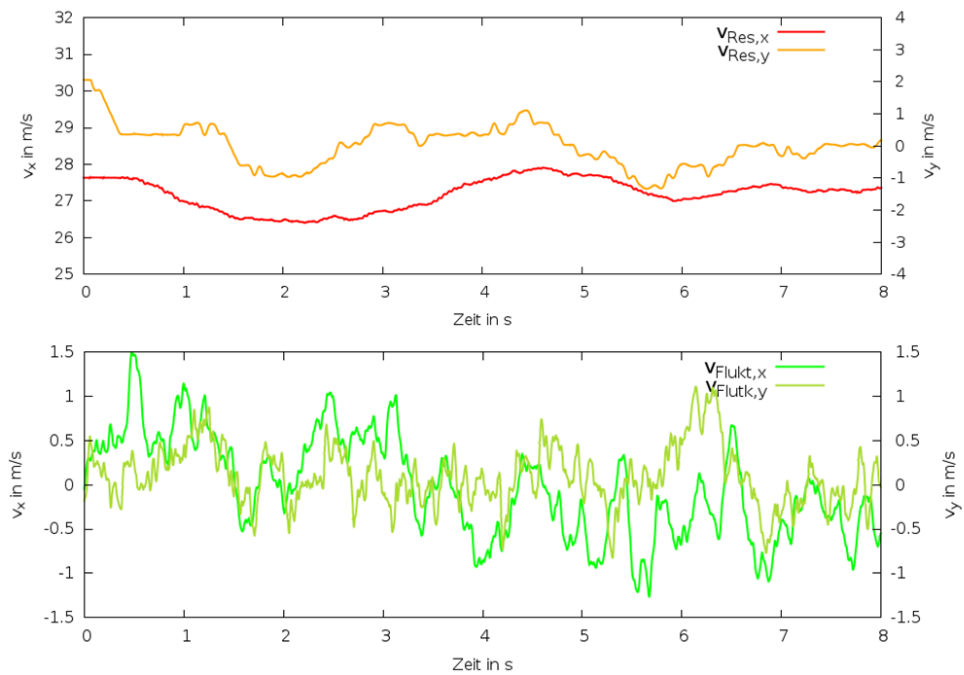
### 5.2.3 Hybrides Verfahren

Zur Erzeugung der Anströmrandbedingungen anhand des hybriden Verfahrens werden, wie **Abbildung 5.9** entnommen werden kann, die berechneten Geschwindigkeitsfluktuationen der Mann-Methode eines charakteristischen Messsignals überlagert. Das bedeutet, dass zur Anwendung dieses Ansatzes sowohl ein charakteristisches Messsignal als auch ein Fluktuationenfeld mit den erzielten Turbulenzgrößen vorliegen müssen. Entsprechend werden die obenstehenden Anmerkungen und das Vorgehen zur Erzeugung der einzelnen Randbedingungen bei Kombination der Ansätze ebenfalls in Betracht gezogen.



**Abbildung 5.9** Skizze der Randbedingung anhand des hybriden Verfahrens

In der vorliegenden Arbeit werden die bereits vorhandenen einzelnen Anströmrandbedingungen für die jeweiligen Strömungssituationen in der Simulation kombiniert. Zur Festlegung der Randbedingung in der Simulationsumgebung wird, wie in den Kapiteln 5.2.1 und 5.2.2 erläutert, das charakteristische Messsignal in Form eines zeitabhängigen Geschwindigkeitsvektors vorgegeben und die Fluktuationen der Mann-Methode tabellarisch eingelesen. **Abbildung 5.10** stellt die Randbedingung zur Abbildung der Strömungssituation *Fahrversuch T2* in der Strömungssimulation dar. Hier sind die zeitabhängigen Geschwindigkeitskomponenten des charakteristischen Messsignals dargestellt sowie exemplarisch die Größenordnung und zeitliche Entwicklung der Geschwindigkeitsfluktuationen an einem beliebigen Punkt abgebildet. Die direkte Kombination der Verfahren kann zu lokalen Überschätzungen der vorgegebenen Geschwindigkeit in der Simulationsdomain führen. Aus dem Grund, dass beide ursprüngliche Randbedingungen bekannt sind, kann dieser Effekt bereits vor der Simulation analysiert werden. Die hier anhand der Kombination von Verfahren abgebildeten Anströmungen weisen keine Erhöhung der Geschwindigkeiten auf, welche die korrekte Abbildung der Strömungssituationen verfälschen können.



**Abbildung 5.10** Hybrides Verfahren: Charakteristisches Messsignal zur Abbildung der Strömungssituation *Fahrversuch T2* (oben) und entsprechende zeitliche Entwicklung der Fluktuationen für einen beliebigen Punkt (unten)

#### 5.2.4 Die „Upstream Turbulence“-Funktion des PowerFLOW®

Es besteht die Möglichkeit, mithilfe des Strömungslösers PowerFLOW® direkt eine instationäre Einlassbedingung zu erzeugen. Die dazu verwendete Funktion wurde in Kapitel 4.4 vorgestellt. Da über das hier verwendete Verfahren zur Berechnung der Fluktuationen keine Dokumentation verfügbar ist, werden nur die abzubildenden Turbulenzgrößen hinsichtlich der Strömungssituationen aufgeführt (siehe **Tabelle 2.1**).

Wie in Kapitel 4.4 beschrieben, liegen keine Informationen über die Geschwindigkeitssignale vor. Aufgrund der Beschreibung der „Upstream Turbulence“-Funktion in [34] wird angenommen, dass für jede Simulation ein bereits vordefiniertes Signal verwendet wird. Dieses wird lediglich über den vorgegebenen turbulenten Längen und Intensitäten skaliert.

In Analogie zur Erzeugung von Anströmrandbedingungen anhand der Mann-Methode wird gleichermaßen das Fluktuationfeld der „Upstream Turbulence“-Funktion einer frontalen Anströmung überlagert, sodass die Anströmgeschwindigkeit 27,1 m/s entspricht.

Dieses Verfahren zur Erzeugung der Fluktuationen hat eine stochastische Anströmung zur Folge. Dementsprechend kann nicht sichergestellt werden, dass das Fahrzeug tatsächlich die vorgegebene Längenskala erfährt. Aus diesem Grund sollten die Simulationsergebnisse auf Basis dieses Verfahrens nicht zu hoch bewertet werden.

## 6 Ergebnisse

Nachdem die Strömungssituation im Fahrversuch charakterisiert wurde und die unterschiedlichen Verfahren zur Modellierung der Windverhältnisse in der Strömungssimulation in den vorangegangenen Kapiteln erklärt wurden, werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der verschiedenen Ansätze betrachtet. Dazu werden zunächst die Ergebnisse aus den numerischen Strömungssimulationen mit stationärer Schräganströmung analysiert. Anschließend werden zur Bewertung der Abbildung von Windverhältnissen in der Strömungssimulation die Ergebnisse der Simulationen mit instationärer Anströmung und die Beiwerte aus dem Fahrversuch gegenübergestellt.

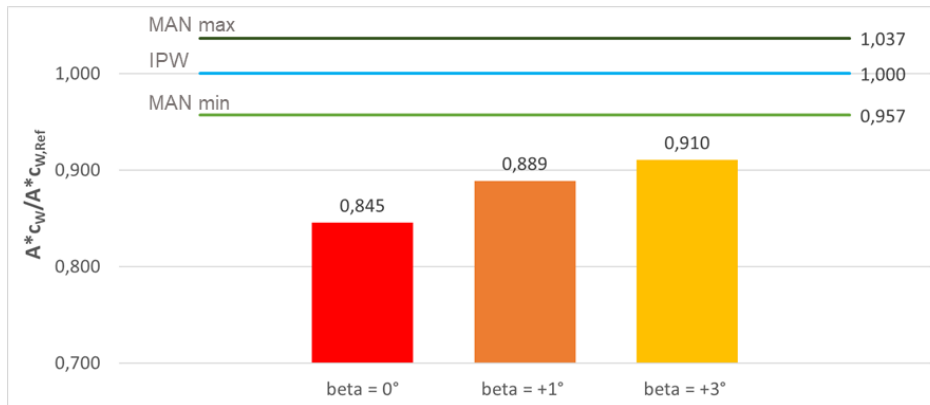
### 6.1 Stationäre Windverhältnisse

Zur Beurteilung des Einflusses der stationären Windverhältnisse auf die Aerodynamik des Nutzfahrzeugs in der Strömungssimulation werden zunächst die Luftwiderstandsbeiwerte  $A \cdot c_W$  des Gesamtfahrzeugs unter verschiedenen seitlichen Anströmungen analysiert. Die transiente Natur der Umströmung des Nutzfahrzeugs, welche durch Ablösungen und den charakteristischen Nachlauf der Vollheckform dominiert wird, ist dafür verantwortlich, dass der Luftwiderstandsbeiwert trotz der zeitlich konstanten Anströmung nicht auf einem bestimmten Wert konvergiert. Aus diesem Grund muss die Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwerts anhand einer zeitlichen Mittelung der vom Fahrzeug erfahrenen aerodynamischen Kräfte erfolgen. Das Mittelungsintervall wird somit in Abhängigkeit der Standardabweichung des Luftwiderstandsbeiwerts definiert und beträgt 4 s Simulationszeit.

Zur Bewertung der hier untersuchten Modellierung der Windverhältnisse in der Strömungssimulation werden die numerisch berechneten Luftwiderstandsbeiwerte mit den im Fahrversuch ermittelten Beiwerten verglichen. Hierfür werden, wie in Kapitel 3.3.1 erwähnt, die von IPW Automotive durchgeführten Fahrversuche und die entsprechende Ermittlung der Widerstandsbeiwerte mit VECTO Air Drag betrachtet. Zudem werden die Versuchsergebnisse berücksichtigt, welche die MAN Truck&Bus mit demselben Prüffahrzeug über das Jahr 2015 verteilt durchführte. Diese Ergebnisse liefern insbesondere relevante Informationen über die Streuung der ermittelten Luftwiderstandsbeiwerte, welche auf die Versuchsbedingungen und die Windverhältnisse auf dem Prüfgelände Dekra Test Oval in Klettwitz zurückzuführen ist [2].

**Abbildung 6.1** stellt die numerisch berechneten Luftwiderstandsbeiwerte unter stationärer Schräganströmung den jeweiligen Werten aus dem Fahrversuch gegenüber. Dabei wurden zur besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse die

aufgeführten Werte mit dem Luftwiderstandsbeiwert des IPW-Fahrversuchs  $A \cdot c_{W,Ref}$  normiert. Zuletzt werden zur Darstellung der Streubreite der Fahrversuchsergebnisse die von der MAN Truck&Bus ermittelten Grenzwerte des Luftwiderstandsbeiwertes dargestellt.



**Abbildung 6.1** Stationäre Schräganströmung: Normierte Luftwiderstandsbeiwerte

Es zeigt sich, dass bei der Abbildung einer idealen frontalen Anströmung ( $\beta = 0^\circ$ ) in der Strömungssimulation die Abweichung des Luftwiderstandsbeiwertes zum Fahrversuch 15,4% beträgt. Durch die Zunahme der seitlichen Komponente der Geschwindigkeit, wie in Kapitel 5.1 festgelegt wurde, steigt der numerisch berechnete Luftwiderstandsbeiwert. Der Einfluss einer stationären Schräganströmung mit einem konstanten Anströmwinkel  $\beta = 3^\circ$  bedeutet eine Steigerung des Beiwertes um 7,6% im Vergleich zur frontalen Anströmung.

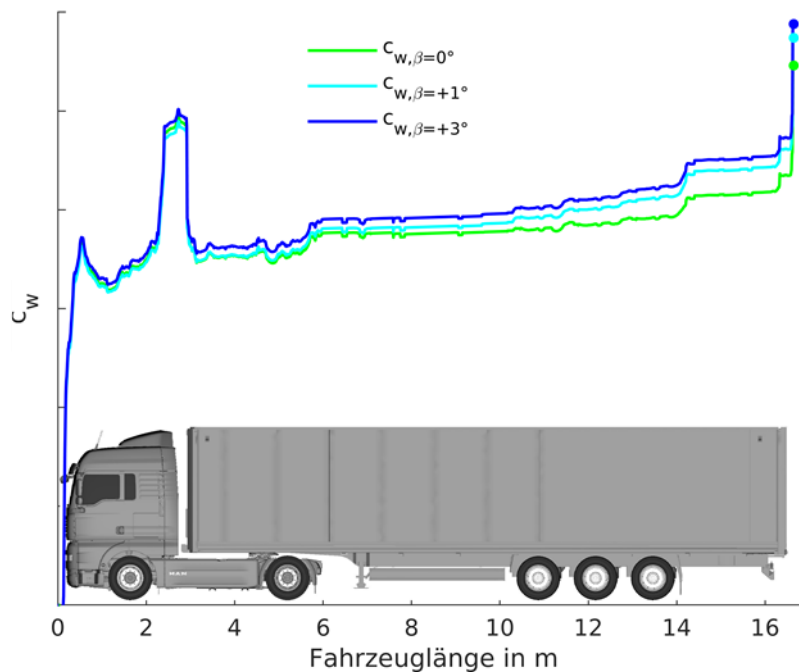
Die Darstellung des Luftwiderstandes entlang der Fahrzeuglängsachse (**Abbildung 6.2**) ermöglicht es, die Identifizierung der aerodynamischen Beiträge mit einem höheren Detaillierungsgrad zu analysieren. Der Beiwert  $c_W(x)$  stellt den kumulierten Widerstand an der jeweiligen x-Position dar und wird nach Gleichung (6.1) berechnet. Dabei erreicht  $c'_W(x)$  für  $x = L$  den Gesamtwiderstandsbeiwert  $c_W$ .

$$c_W = \int_0^x c'_W(x) dx \quad (6.1)$$

Die in **Abbildung 6.2** dargestellten  $c_W(x)$ -Verläufe lassen zunächst feststellen, dass die Entwicklung der Beiwerte unter verschiedener stationärer Schräganströmung die gleichen topologischen Merkmale aufweist. Die ähnliche Steigerung des Luftwiderstandsbeiwertes an der Fahrerhausfront deutet daraufhin, dass vergleichbare Druckverhältnisse am Staupunkt herrschen. Der weitere  $c_W(x)$ -Verlauf im Zugmaschinenbereich zeigt ein strömungsgünstiges Verhalten der Kabine sowie der Durchströmung des Freiraums bei  $\beta = 1^\circ$  Schräganströmung. Die Steigerung des Luftwiderstands aufgrund der seitlichen Anströmung findet überwiegend im Aufliegebereich statt. Dort



ist die Topologie des  $c_W(x)$ -Verlaufs hauptsächlich durch die Umströmung des Unterbodens beeinflusst und stark von der Schräganströmung abhängig. Schlussendlich führt das Abreißen der Strömung am Fahrzeugheck zu einer finalen Erhöhung des Widerstandsbeiwertes, welche in Abhängigkeit des Anströmwinkels  $\beta$  moderat zunimmt.



**Abbildung 6.2** Stationäre Schräganströmung: Luftwiderstandsbeiwert über der Längsachse

Die Modellierung von Windverhältnissen anhand der stationären Schräganströmung bedeutet eine Steigerung des Luftwiderstandsbeiwertes um ca. 5,2% bei  $\beta = 1^\circ$  und 7,6% bei  $\beta = 3^\circ$  im Vergleich zu einer idealen Frontalanströmung. Diese Werte stellen trotzdem eine signifikante Abweichung zu dem anhand des Fahrversuchs ermittelten Beiwert dar. Die analysierte Entwicklung des Luftwiderstands weist eine eindeutige Tendenz des Einflusses der seitlichen Anströmung und entsprechend der dafür verantwortlichen Entstehungsmechanismen auf. Allerdings zeigt sich, dass die vom Nutzfahrzeug erfahrene Anströmung, wie in Kapitel 3.3 analysiert wurde, kein stationäres Verhalten darstellt und dass die im Fahrversuch erfassten durchschnittlichen Werte des Anströmwinkels  $\beta$  deutlich niedriger als die numerisch berechneten waren. Somit ist die Abbildung von Windverhältnissen in der Strömungssimulation anhand stationärer Seitenwindbedingungen nur begrenzt zielführend.

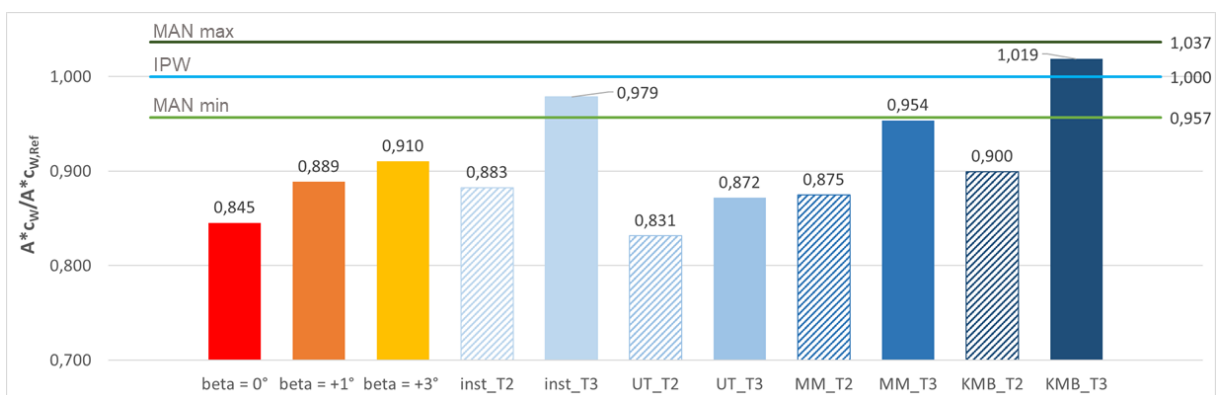
## 6.2 Instationäre Windverhältnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse der numerischen Strömungssimulationen zur Abbildung instationärer Windverhältnisse vorgestellt und eingehend analysiert. Zur besseren Lesbarkeit der dargestellten Ergebnisse werden die Untersuchungen anhand charakteristischer Messsignale „INST“ genannt. Als „MM“ werden die numerischen Untersuchungen bezeichnet, bei welchen die Mann-Methode zur Erzeugung der Einlassrandbedingung verwendet wurde. Analog wird mit „UT“ (Upstream-Turbulence) auf die Simulationen mit dem Turbulenz-Generator des PowerFLOW® verwiesen. Unter „KMB“ wird die Anwendung des hybriden Verfahrens verstanden.

### 6.2.1 Luftwiderstandsbeiwerte

Der Einfluss der Abbildung instationärer Windverhältnisse auf die Aerodynamik des Nutzfahrzeugs in der Strömungssimulation erfolgt zunächst durch die Analyse der Luftwiderstandsbeiwerte  $A \cdot c_W$  des Gesamtfahrzeugs. Die  $A \cdot c_W$ -Werte werden aufgrund ihrer zeitabhängigen Entwicklung, welche die instationäre Natur der vorgegebenen Anströmung zur Folge hat, zeitlich gemittelt. Die Mittelung erfolgt, wie in Kapitel 5 festgelegt wurde, konsistent mit der Zeitfensterdauer der vorgegebenen Anströmrandbedingung von 8 s.

Die anhand der numerischen Strömungssimulation gewonnenen  $A \cdot c_W$ -Werte sind in **Abbildung 6.3** zusammengefasst und den Beiwerten aus dem Fahrversuch gegenübergestellt. Hier sind zudem die Ergebnisse unter den untersuchten Strömungssituationen, *Fahrversuch T2* und *Fahrversuch T3*, für die jeweiligen Ansätze aufgetragen. In Anlehnung an **Abbildung 6.1** sind die dargestellten Werte zur besseren Vergleichbarkeit mit dem Luftwiderstandsbeiwert des IPW-Fahrversuchs  $A \cdot c_{W,Ref}$  normiert.



**Abbildung 6.3** Instationäre Anströmung: Normierte Luftwiderstandsbeiwerte

Zur ersten Beurteilung des Einflusses der Abbildung von Windverhältnissen in der Strömungssimulation werden zunächst die  $A \cdot c_W$ -Werte der stationären und der instationären Anströmungen miteinander verglichen. Es zeigt sich, dass die Untersuchungen mit den unterschiedlichen instationären Anströmrandbedingungen, abgesehen von denen mit der UT-Funktion, ein ähnliches Verhalten hinsichtlich der absoluten Luftwiderstandsbeiwerte sowie bei der Abbildung der zwei Strömungssituationen darstellen. Zum einen sind die  $A \cdot c_W$ -Werte der instationären Ansätze bei der Abbildung der Strömungssituation *Fahrversuch T2* vergleichbar mit denen von der stationären Schräganströmung  $\beta = 1^\circ$ , zum anderen befinden sich die  $A \cdot c_W$ -Werte zur Abbildung der Strömungssituation *Fahrversuch T3* innerhalb der Streubreite der Fahrversuchsergebnisse.

Die Modellierung der instationären Anströmsituationen anhand charakteristischer Messsignale aus dem Fahrversuch sind in **Abbildung 6.3** als *inst\_T2* und *inst\_T3* bezeichnet. Die dabei berechneten  $A \cdot c_W$ -Werte deuten darauf hin, dass die Abbildung instationärer Anströmungen einen erheblichen Einfluss auf die Aerodynamik des Nutzfahrzeugs hat. Hierbei weist die Anströmsituation *inst\_T2* einen  $A \cdot c_W$ -Wert um 4,5 % höher als bei einer idealen Frontalanströmung ( $\beta = 0^\circ$ ) auf. Ebenso bewirken die Strömungsverhältnisse der Strömungssituation in *inst\_T3* nur noch eine geringe Abweichung zum Fahrversuchsergebnis, welche nur 2,1 % beträgt.

Der Vergleich der Anströmverfahren untereinander, welche darauf basieren Geschwindigkeitsfluktuationfelder einer Frontalanströmung zu überlagern, zeigt zunächst große Unterschiede zwischen den Ansätzen sowohl bezüglich der absoluten  $A \cdot c_W$ -Werte als auch im Hinblick auf die Abbildung der verschiedenen Strömungssituationen. Während die Modellierung anhand der „Upstream-Turbulence“-Funktion einen niedrigen Einfluss auf den  $A \cdot c_W$ -Wert haben und wenig sensitiv auf die Strömungssituation reagieren, sind die Simulationsergebnisse bei der Anwendung der Fluktuationfelder der Mann-Methode nahezu vergleichbar mit denen von den Untersuchungen des charakteristischen Messsignals. In diesem Zusammenhang weist die Abbildung der Strömungssituation *Fahrversuchstag 2* anhand der Mann-Methode (*MM\_T2*) beispielsweise einen vergleichbaren  $A \cdot c_W$ -Wert wie eine stationäre Schräganströmung  $\beta = 1^\circ$  und *inst\_T2* auf. Zudem beträgt die Abweichung zum Fahrversuchsergebnis mit der *MM\_T3* 4,6 %.

Das unterschiedliche Verhalten des Luftwiderstandes bei der Anwendung von Anströmrandbedingungen, welche auf der „Upstream-Turbulence“-Funktion basieren, kann unter anderem auf die Stochastik, welche dem Verfahren zu Grunde liegt, zurückgeführt werden. Nach Kapitel 5.2 kann angenommen werden, dass zur Erzeugung der turbulenten Fluktuationen bei der „Upstream-Turbulence“-Funktion des PowerFLOW®, analog zur Mann-Methode, eine zufällige Verteilung verwendet wird.

Dadurch resultiert eine stochastische Verteilung der Geschwindigkeiten, welche auch die stochastische räumliche Verteilung der turbulenten Intensität und Längenskala zur Folge hat. Das zu untersuchende Fahrzeug erfährt damit unter Umständen nicht die vorgegebenen Turbulenzgrößen. Es wird vermutet, dass dies eine mögliche Ursache für die geringe Zunahme der Luftwiderstandsbeiwerte ist. Dies konnte bei der in dieser Arbeit implementierten Mann-Methode unter Zuhilfenahme eines Suchalgorithmus, wie in Kapitel 5.2.2 erläutert wurde, verhindert werden.

Die kleinste Abweichung der berechneten Luftwiderstandsbeiwerte zum Fahrversuchsergebnis ergibt sich bei der Anwendung des hybriden Verfahrens (*KMB\_2* und *KMB\_3*). Hier weist die Kombination der Ansätze einen Luftwiderstand bei der Abbildung der Strömungssituation *Fahrversuchstag 2* vergleichbar mit einer stationären Schräganströmung  $\beta = 3^\circ$  auf und der  $A \cdot c_W$ -Wert der Untersuchung *KMB\_3* übersteigert den im IPW-Fahrversuch ermittelten Luftwiderstand um circa 2 %.

Die Analyse der Luftwiderstandsbeiwerte des Gesamtfahrzeugs  $A \cdot c_W$  verschafft einen Überblick des Einflusses sowie des Potentials und der Prognosegüte der Ansätze zur Modellierung der instationären Windverhältnisse in der Strömungssimulation. Um konkrete Aussagen hinsichtlich des aerodynamischen Verhaltens des Nutzfahrzeugs unter instationärer Anströmung oder der Entstehungsmechanismen des Luftwiderstands formulieren zu können, muss allerdings eine ausführliche Ermittlung der Zeitabhängigkeit der aerodynamischen Kräfte und der luftwiderstands-erzeugenden Bereiche am Fahrzeug durchgeführt werden.

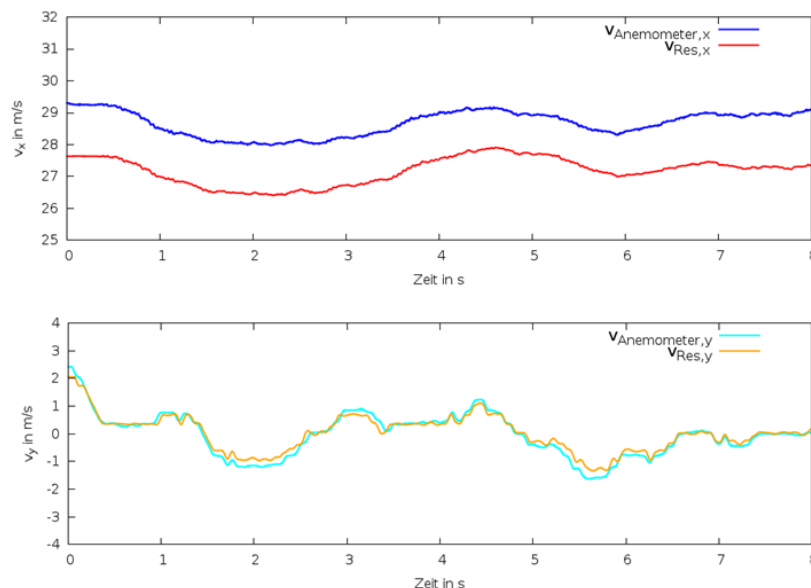
## 6.2.2 Zeitliche Entwicklung der aerodynamischen Kräfte

In diesem Abschnitt wird das zeitliche Verhalten der Interaktion des Nutzfahrzeugs mit der instationären Anströmung analysiert. Dafür werden die am Fahrzeug wirkenden Kräfte den vorgegebenen Anströmrandbedingungen gegenübergestellt.

Eine eindeutige Korrelation zwischen der Anströmung und der zeitlichen Entwicklung der aerodynamischen Kräfte am Fahrzeug ist in manchen der untersuchten Strömungsszenarien schwer festzustellen. Dieses Verhalten des Luftwiderstands in den durchgeführten Untersuchungen kann auf zwei Ursachen zurückgeführt werden. Die erste Ursache ist die stark variierende Strömungstopologie an den luftwiderstands-erzeugenden Bereichen des Fahrzeugs. Zusätzlich zur Komplexität der Um- und Durchströmung eines Nutzfahrzeugs, verursacht ein beliebiges Strömungsereignis einer instationären Anströmung eine zeitlich versetzte und lokal unterschiedliche Fahrzeugreaktion. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass die Nutzfahrzeuglänge 16,5 m beträgt und entsprechend eine einheitliche aerodynamische Reaktion des Fahrzeugs auf eine Strömungsanregung nicht zu erwarten ist.

Die zweite Ursache stellt der Ansatz zur Modellierung der instationären Anströmung dar. Dies ist insbesondere bei Anströmungen, die ausschließlich auf Fluktuationfelder basieren, zu erkennen. Grund dafür ist die räumliche Fluktuation der Geschwindigkeit, sodass die an einem konkreten Punkt der Einlassbedingung vorgegebene Geschwindigkeit die vom Fahrzeug tatsächlich erfahrene Anströmung nicht repräsentativ genug darstellt. Entsprechend können unter Umständen die Auswirkungen am Fahrzeug nicht direkt mit der Anströmung in Zusammenhang gebracht werden.

Zur Analyse der seitlichen Entwicklung des Luftwiderstands und deren Zusammenhänge mit der vorgegebenen Anströmung wird, in Anlehnung zum Fahrversuch, die Geschwindigkeit 1,35 m über der Oberkante der Aufliegerstirnfläche im Laufe der Strömungssimulation erfasst und als Referenz für die Entwicklung der Kräfte betrachtet. Dies ermöglicht zum einen den nachträglichen Vergleich mit den vom Anemometer im Fahrversuch aufgenommenen Geschwindigkeiten, zum anderen lässt sich der sogenannte Fahrzeugeinfluss auf die Anströmung eines Nutzfahrzeugs quantifizieren.

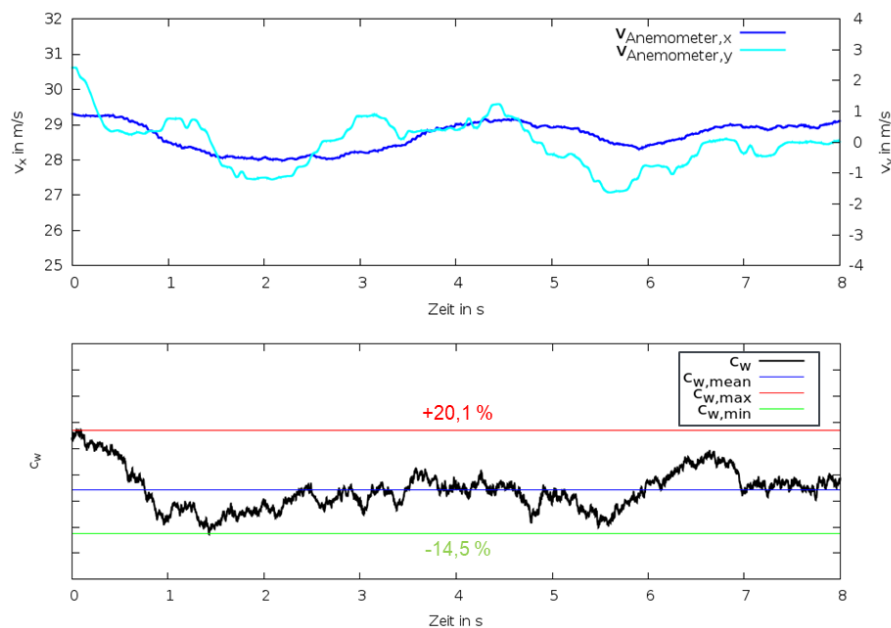


**Abbildung 6.4** Charakteristisches Messsignal *inst\_T2*: Übertragungsverhalten zwischen vorgegebener Anströmung ( $v_{Res}$ ) und der Geschwindigkeit am virtuellen Anemometer ( $v_{Anemometer}$ )

In **Abbildung 6.4** sind die Geschwindigkeitskomponenten der vorgegebenen Anströmung mit denen auf Anemometerhöhe für die numerische Untersuchung *inst\_T2* verglichen. Der Fahrzeugeinfluss, das heißt, die Beschleunigung der Strömung aufgrund der Verdrängung des Fahrzeugs, welche auf Anemometerhöhe eindeutig zu erkennen ist, bedeutet eine durchschnittliche Erhöhung der longitudinalen

Komponente der Geschwindigkeit von ca. 5,7% im Vergleich zur vorgegebenen Anströmgeschwindigkeit. Die an der Position des Anemometers erfasste Querkomponente der Geschwindigkeit weist eine vergleichsweise moderate Abweichung auf, die jedoch eindeutig mit der Zunahme der seitlichen Komponente aufgrund der ungünstigen lateralen Anströmung des Nutzfahrzeugs wächst. Zudem kann auch aus **Abbildung A.3** entnommen werden, dass im Allgemeinen das Übertragungsverhalten eine gute Übereinstimmung mit der vorgegebenen Anströmung aufweist.

Die Auswirkung der instationären Anströmung auf die zeitliche Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts bei den numerischen Untersuchungen mit dem charakteristischen Messsignal, *inst\_T2* und *inst\_T3*, lassen sich besonders gut erkennen. Der Grund dafür ist, dass zur Definition derartiger Anströmrandbedingungen die longitudinalen und lateralen Geschwindigkeitskomponenten über den gesamten Einlass in der Simulationsdomain vorgegeben werden. Entsprechend erfährt das Nutzfahrzeug eine zeitabhängige, aber homogene Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt.

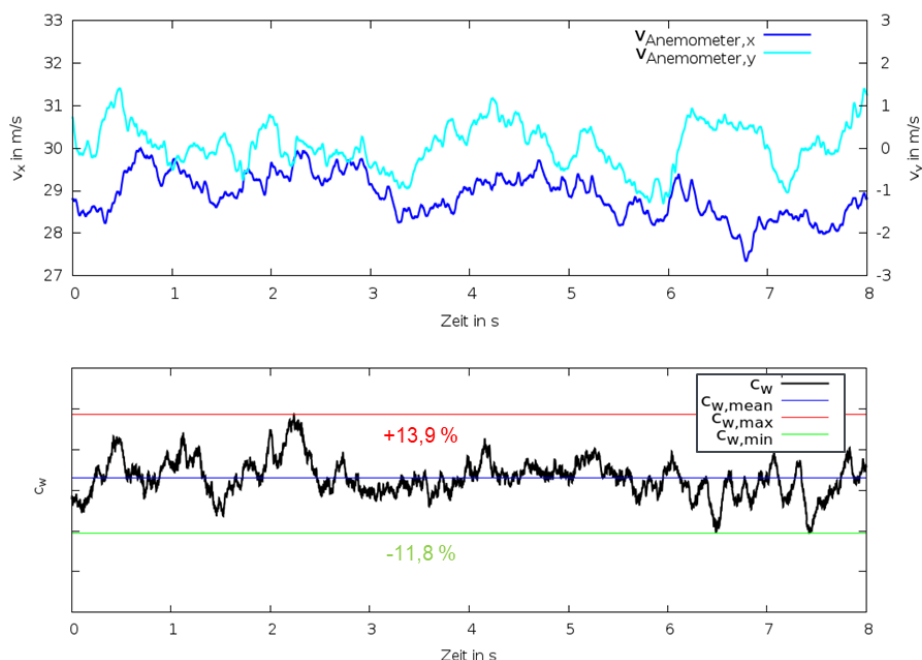


**Abbildung 6.5** Charakteristisches Messsignal *inst\_T2*: Zeitliche Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts und der Geschwindigkeit am virtuellen Anemometer

**Abbildung 6.5** und **Abbildung A.4** stellen das Gesamtbild der am Fahrzeug agierenden aerodynamischen Kräfte jeweils für die Abbildung der Strömungssituationen *Fahrversuch T2* und *Fahrversuch T3* dar. Die Auswirkung der tief-frequenten Anteile der Anströmung kann an der Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwertes erkannt werden. Dabei zeigt sich, dass die Änderung der Querkomponente

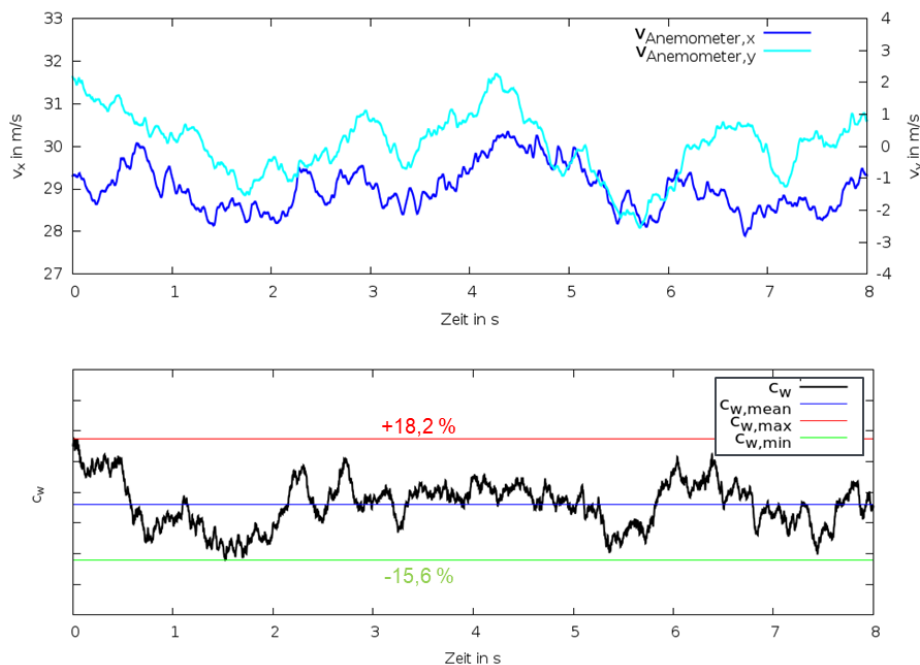
der Anströmung einen dominierenden Einfluss auf die Entwicklung des Luftwiderstands hat. Zudem deutet die Streuung des Luftwiderstands über die Zeit der modellierten Strömungssituationen darauf hin, dass das Fahrzeug sensitiv auf die vorgegebenen instationären Randbedingungen reagiert und somit den Einfluss der turbulenten Situation konsistent abbildet.

Analog zu der obigen Analyse des Luftwiderstands lassen sich die Auswirkungen der anhand der Mann-Methode modellierten instationären Anströmungen in **Abbildung 6.6** und **Abbildung A.5** darstellen. Es zeigt sich, dass im Vergleich zu der Anströmung des charakteristischen Messsignals die erfassten Geschwindigkeiten der numerischen Untersuchungen mit der Mann-Methode ausgeprägte hochfrequente Strömungsanteile aufweisen. Aus dem Grund, dass die vorgegebenen Geschwindigkeiten der räumlichen Fluktuationen unterliegen, fällt es zudem schwer, einen direkten Zusammenhang zwischen den auf Anemometerhöhe aufgenommenen Geschwindigkeiten und den aerodynamischen Kräften festzustellen. Dies kann insbesondere bei der Abbildung der Strömungssituation *Fahrversuchstag 2* in **Abbildung 6.6** erkannt werden. Letztlich weist die Anwendung der Mann-Methode, trotz eines vergleichbaren durchschnittlichen Luftwiderstandsbeiwerts, eine kleinere Streuung des Luftwiderstandsbeiwerts über die Zeit auf, als die Untersuchungen mit dem charakteristischen Messsignal.



**Abbildung 6.6** Mann-Methode *MM\_T2*: Zeitliche Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts und der Geschwindigkeit am virtuellen Anemometer

Die untersuchten Anströmverfahren zeigen, dass sowohl die Anwendung eines charakteristischen Messsignals als auch die Modellierung von Fluktuationenfeldern einen erheblichen Einfluss auf den durchschnittlichen Luftwiderstandsbeiwert und auf dessen zeitliche Entwicklung haben. Beide Ansätze tragen dazu bei, eine Erhöhung des energetischen Zustands der vom Fahrzeug erfahrenen Anströmung in der Strömungssimulation zu modellieren. Wie aus **Abbildung 6.3** entnommen werden kann, ist die durchschnittliche Zunahme des Luftwiderstandsbeiwerts bei den Untersuchungen *inst\_T2* und *MM\_T2* vergleichbar. Dies wird allerdings durch zwei unterschiedlich vorgegebene Anströmtopologien verursacht, wie in **Abbildung 6.5** und **Abbildung 6.6** darstellt. Hierbei stellt das charakteristische Messsignal eine zeitabhängige aber homogene Geschwindigkeitsverteilung über den Querschnitt dar, welche keine räumliche Abhängigkeit, wie sie im Falle des natürlichen Winds vorliegt, ausweist. Andererseits wird bei der Anwendung der Mann-Methode eine ideale Frontalanströmung mit Geschwindigkeitsfluktuationen überlagert. Dabei ist die Betrachtung einer Frontalanströmung mit  $\beta = 0^\circ$ , trotz des kleineren durchschnittlichen Anströmwinkels im Vergleich zum Fahrversuch eine zum Teil vereinfachte Darstellung des natürlichen Windverhaltens. Deshalb führt die Anwendung des hybriden Verfahrens, welches beide obigen Ansätze kombiniert, zu einer physikalisch betrachtet korrekten Abbildung der instationären Windverhältnisse.



**Abbildung 6.7** Hybrides Verfahren *KMB\_T2*: Zeitliche Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts und Geschwindigkeit am virtuellen Anemometer



Die Ergebnisse der Untersuchungen mit dem hybriden Verfahren sind in **Abbildung 6.7** und **Abbildung A.6** dargestellt. Wie in **Abbildung 6.7** erkennbar ist, weist die zeitliche Entwicklung der Geschwindigkeitskomponenten auf Anemometerhöhe Merkmale beider Anströmverfahren auf. Daraus ergibt sich eine Anströmung, welche die tieffrequenten Strömungsanteile des charakteristischen Messsignals *inst\_T2* besitzt und gleichzeitig die räumliche Fluktuation der *MM\_T2*, repräsentativ für die natürlichen Windverhältnisse, abbildet. Nach **Abbildung 6.3** weist diese Kombination der Anströmverfahren eine moderate Erhöhung des durchschnittlichen Luftwiderstands im Vergleich zu den ursprünglichen Ansätzen auf. Zudem liegt die Streuung der Werte über der Zeit in einem Bereich mit dem charakteristischen Messsignal *inst\_T2*.

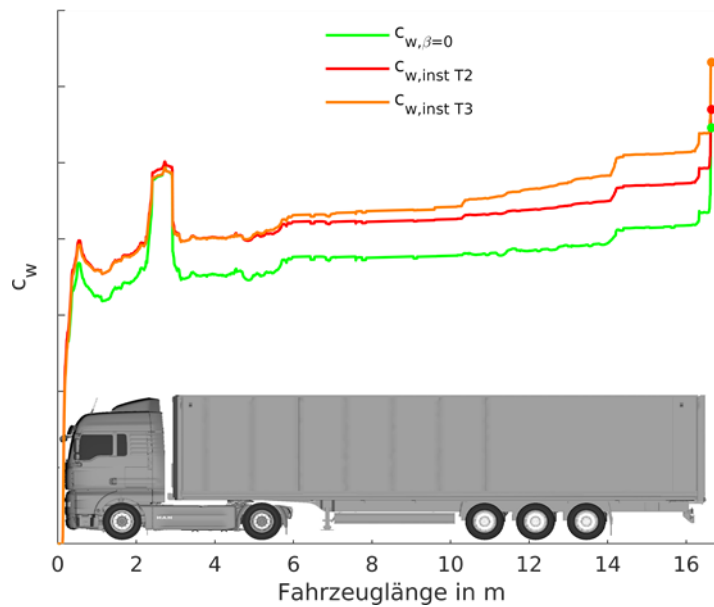
Die Analyse der Entwicklung der aerodynamischen Kräfte unter einer instationären Anströmung liefert grundlegende Kenntnisse über die zeitabhängige Auswirkung am Fahrzeug und das Übertragungsverhalten. Um konkrete Aussagen über die Entstehung des Luftwiderstands formulieren zu können, muss allerdings eine ausführliche Analyse der Kräfte und der Strömungstopologie durchgeführt werden. Dafür werden im Folgenden die Bereiche am Nutzfahrzeug ermittelt, die einen wesentlichen Einfluss auf den Luftwiderstandsbeiwert haben.

### 6.2.3 Strömungstopologie und Entstehung des Luftwiderstands

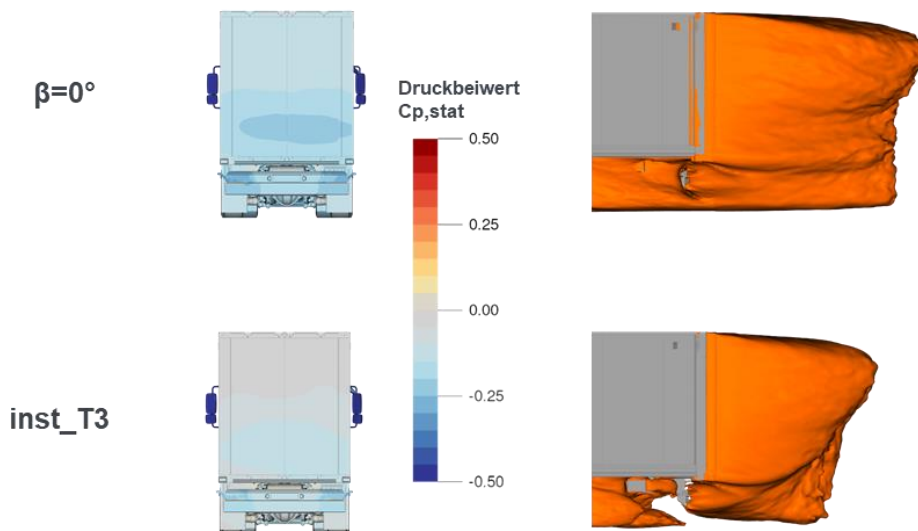
Im Folgenden wird auf die instationäre Strömungstopologie um das Fahrzeug und deren Beitrag zur Luftwiderstandsentstehung eingegangen. Die Beschreibung der instationären aerodynamischen Fahrzeugeigenschaften erfolgt durch eine ausführliche Untersuchung der luftwiderstandserzeugenden Bereiche am Nutzfahrzeug. Hierfür wird nach Gleichung (6.1) der zeitlich gemittelte Luftwiderstandsbeiwert über der Fahrzeuglängsachse aufgetragen und analysiert.

**Abbildung 6.8** stellt die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen anhand des charakteristischen Messsignals einer stationären idealen Frontalanströmung gegenüber. Dabei ermöglicht die Darstellung der unterschiedlichen Anströmsituationen den Einfluss der turbulenten Anströmung auf das aerodynamische Fahrzeugverhalten zu studieren.

Die verschiedenen  $c_w(x)$ -Verläufe weisen die gleichen topologischen Merkmale auf und heben somit die charakteristischen luftwiderstandserzeugenden Strömungsstrukturen am Nutzfahrzeug hervor. Zu den markanten Unterschieden zwischen der stationären Frontalanströmung und den Untersuchungen mit dem charakteristischen Messsignal zählt die ungünstigere Anströmung der Zugmaschinenfront, welche durch Ablösung verursachte instationäre Kräfte den  $c_w$ -Wert lokal erhöht.



**Abbildung 6.8** Luftwiderstandsbeiwert über der Längsachse: Instationäre Anströmung anhand des charakteristischen Messsignals



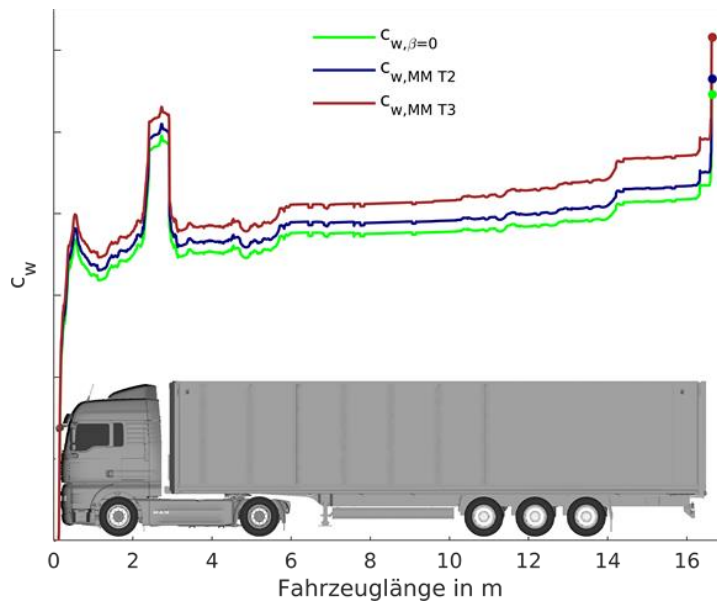
**Abbildung 6.9** Oberflächendrucke und Isofläche  $c_{p, total} = 0$  am Fahrzeugheck: Stationäre Frontalanströmung (oben) und instationäre Anströmung anhand des charakteristischen Messsignals  $inst\_T3$  (unten)

Auf die Entstehungsmechanismen des Luftwiderstands im Aufliegerbereich soll ein besonderes Augenmerk gelegt werden. Hierbei steigt der Luftwiderstand im Aufliegerbereich aufgrund der zeitabhängigen lateralen Anströmkomponente. Die  $c_w(x)$ -Verläufe zeigen wie die aerodynamischen Kräfte überwiegend durch die Umströmung

des Unterbodens beeinflusst sind. Zudem deuten die Abweichungen zwischen den instationären Untersuchungen darauf hin, dass der Luftwiderstand stark von der Größenordnung der seitlichen Anströmung abhängig ist. Letztlich ist das Abreißen der Strömung am Fahrzeugheck für eine erneute und sprunghafte Zunahme des Luftwiderstandsbeiwertes verantwortlich, wohingegen die Auswirkung bei den instationären Untersuchungen signifikant geringer als bei der idealen Frontalanströmung ist. Grund dafür ist die Beeinflussung der Nachlauftopologie durch die instationäre Windanregung. Die Strömungsablösung am Nutzfahrzeugheck ist charakteristisch für die Vollheck-Fahrzeugform und verursacht die Bildung eines ausgeprägten Totwassergebiets. Dieses wird, wie **Abbildung 6.9** entnommen werden kann, aufgrund der instationären Anströmung topologisch signifikant verändert, sodass eine Erhöhung des Basisdrucks resultiert.

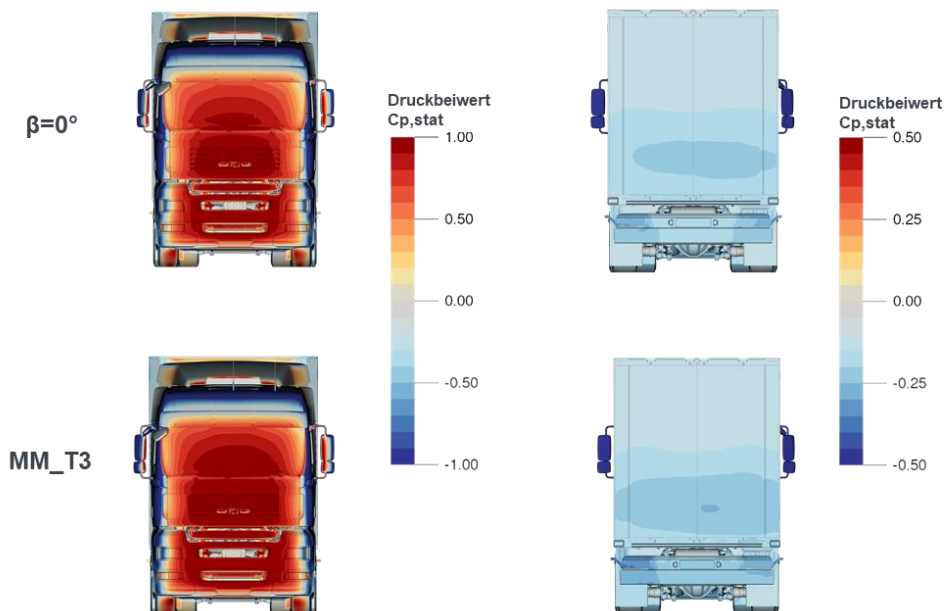
Die Abbildung der instationären Windverhältnisse anhand des charakteristischen Messsignals kennzeichnet sich durch eine zeitabhängige und über den Querschnitt homogene Geschwindigkeitsverteilung. Infolge der dominierender tieffrequenter Strömungsanteile, welche in Abschnitt 6.2.2 analysiert wurden, kann diese Anströmung als wechselhafte Windsituation betrachtet werden. Diese sorgt für eine ungünstigere Anströmung der Zugmaschinenfront sowie der Durchströmung des Freiraums. Die Luftwiderstandsentsstehung am Auflieger ist vergleichbar mit der einer stationären Schräganströmung und ist auf die seitliche Komponente der Geschwindigkeit zurückzuführen. Zuletzt erschwert die variierende seitliche Anströmung die Bildung des Nachlaufs und verursacht eine moderate Steigerung des Basisdrucks am Fahrzeugheck.

Die  $c_W(x)$ -Entwicklung der Untersuchungen anhand der Fluktuationfelder der Mann-Methode ist in **Abbildung 6.10** zu finden. Auch hier sind alle charakteristischen aerodynamischen Merkmale infolge der Anströmung zu erkennen. Die  $c_W(x)$ -Verläufe der instationären Untersuchungen zeigen ein topologisch ähnliches Verhalten wie die ideale Frontalanströmung, wobei die Auswirkung auf die aerodynamischen Kräfte mit den turbulenten Eigenschaften der Anströmung zunehmen. Hierbei steigt der Luftwiderstand im gesamten Zugmaschinenbereich aufgrund der strömungsungünstigeren Anströmung des Führerhauses sowie durch die verstärkte seitliche Durchströmung des Freiraums an. Der höhere energetische Zustand der Anströmung infolge der fluktuierenden Geschwindigkeiten sorgt dafür, dass zunehmende energetische Verluste in den Strömungsablösebereichen stattfinden. Entsprechend nimmt der Luftwiderstand über der Aufliegerlänge in Abhängigkeit der abgebildeten Anströmsituation zu. Ein ähnliches Verhalten ist am Fahrzeugheck zu beobachten. Dort verursachen die stärkeren dissipativen Strömungsphänomene eine Senkung des Basisdrucks.

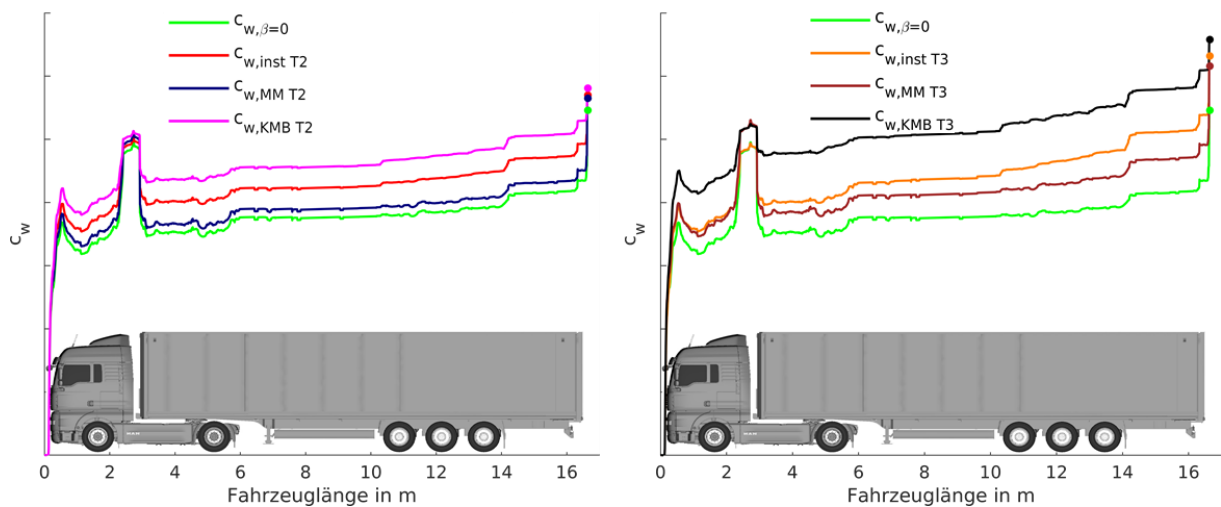


**Abbildung 6.10** Luftwiderstandsbeiwert über der Längsachse: Instationäre Anströmung anhand der Mann-Methode

Wie aus **Abbildung 6.11** zu entnehmen ist, nehmen im Fall der instationären Anströmung anhand der Mann-Methode die Oberflächendrücke auf der Stirnfläche der Kabine zu. Zugleich vergrößert sich das Gebiet maximalen Unterdrucks, das am Heck entsteht. Zusammen spiegeln sich beide Effekte im Luftwiderstandsbeiwert wider.



**Abbildung 6.11** Oberflächendrücke an der Kabinenstirnfläche und am Fahrzeugheck: Unter einer Frontanströmung (oben) und bei instationärer Anströmung anhand der Mann-Methode (unten)



**Abbildung 6.12** Luftwiderstandsbeiwert über der Längsachse: Instationäre Anströmung anhand Ansätze zur Abbildung der Strömungssituation *Fahrversuchstag 2* (links) und *Fahrversuchstag 3* (rechts)

Die Ergebnisse der Untersuchungen anhand instationärer Anströmung sind in **Abbildung 6.12** in Abhängigkeit der abzubildenden Strömungssituation aus dem Fahrversuch zusammengefasst.

Zunächst werden die Ergebnisse der jeweiligen Strömungssituationen untereinander verglichen. Es zeigt sich unabhängig von dem angewandten Ansatz zur Modellierung der instationären Windverhältnisse, dass alle Verfahren ähnliche topologische Auswirkungen auf die  $c_w(x)$ -Entwicklung bei der Abbildung der Strömungssituation *Fahrversuchstag 2* aufweisen. Allein am Fahrzeugheck, wie in den obigen Abschnitten erläutert wurde, sind aufgrund der instationären Beeinflussung des Nachlaufs unterschiedliche Verhältnisse zu erkennen. In diesem Zusammenhang zeigt die Topologie des  $c_w(x)$ -Verlaufs des hybriden Verfahrens *KMB\_T2* eine bedeutende Ähnlichkeit mit dem charakteristischen Messsignal *inst\_T2*. Dabei unterscheiden sich die entsprechenden Verläufe nur hinsichtlich der Steigerung des Staudruckeinflusses sowie der Abnahme der am Fahrzeugheck wirkenden Kräfte.

Durch einen Vergleich der  $c_w(x)$ -Verläufe des hybriden Verfahrens in den unterschiedlichen Strömungssituationen wird ersichtlich, dass dieser Ansatz die Entstehung des Luftwiderstands gleichermaßen bewirkt. Hierbei verursacht die Kombination der Verfahren, wie aus **Abbildung 6.12** entnommen werden kann, eine geringere Widerstandskraft am Fahrzeugheck, die mit einem zunehmenden Basisdruck zusammenhängt. Ebenfalls sorgt das hybride Verfahren für eine Zunahme des Luftwiderstands an der Fahrzeugstirnfläche. Diese zeigt allerdings bei der Untersuchung *KMB\_T3* einen vergleichsweise starken Einfluss, welcher auf eine Überschätzung der Anströmungsgeschwindigkeit aufgrund der stochastischen Verteilung der Geschwindigkeiten zurückzuführen ist.

### 6.3 Diskussion der Ergebnisse

Die Abbildung der im Fahrversuch beobachteten Windverhältnisse in der numerischen Strömungssimulation kann sowohl anhand einer stationären Anströmung betrachtet werden als auch durch die Modellierung der instationären Strömungsphänomene des natürlichen Windes erfolgen.

Zur Untersuchung der Aerodynamik des Nutzfahrzeugs unter stationären Windverhältnissen werden zunächst durchschnittliche Windbedingungen aus dem Fahrversuch ausgewertet. Diese werden in der numerischen Strömungssimulation durch Randbedingungen vorgegeben, welche die Abbildung unterschiedlicher Schräganströmungen ermöglichen. Die Betrachtung der stationären seitlichen Anströmung verursacht eine deutliche Zunahme des Widerstandsbeiwerts mit zunehmendem Anströmwinkel. Dabei zeigt sich, dass die Entstehung des Luftwiderstands auf die ungünstigere An- und Durchströmung der Zugmaschine sowie überwiegend auf die seitliche Umströmung des Aufliegers zurückzuführen ist. Die Schräganströmung bedeutet eine Steigerung des Luftwiderstandsbeiwertes um ca. 5,2 % bei  $\beta = 1^\circ$  und 7,6 % bei  $\beta = 3^\circ$  im Vergleich zur idealen Frontalanströmung. Diese Werte stellen, wie aus **Tabelle 6.1** zu entnehmen ist, trotzdem eine signifikante Abweichung zu dem im Fahrversuch ermittelten Beiwert dar.

Die in Kapitel 3.3 analysierten Fahrversuchsergebnisse zeigen, dass die vom Nutzfahrzeug erfahrene Anströmung kein stationäres Verhalten darstellt und dass, die im Versuch erfassten durchschnittlichen Werte des Anströmwinkels  $\beta$  gering sind. Entsprechend ist die Anwendung dieses stationären Ansatzes nur begrenzt zulässig.

**Tabelle 6.1** Prozentuale Abweichung des Luftwiderstands zum Fahrversuchsergebnis

Stationäre Windverhältnisse			Instationäre Windverhältnisse (Durchschnitt T2 u.T3)			
Frontale Anströmung	$\beta = 1^\circ$	$\beta = 3^\circ$	Charakteristisches Messsignal	Upstream Turbulence	Mann-Methode	Hybrides Verfahren
15,5 %	11,1 %	9,0 %	6,9 %	14,8 %	8,5 %	4,1 %

Die Modellierung der natürlichen Windverhältnisse in der Strömungssimulation anhand einer instationären Anströmung ist mithilfe der bereits vorgestellten Anströmverfahren möglich. Grundlegend bedeutet die Berücksichtigung des zeitabhängigen Verhaltens der Anströmung eine Erhöhung des energetischen Zustands der Strömung, die das Fahrzeug in Form von zeitlich und räumlich variierenden Geschwindigkeiten erfahren wird. Das heißt, dass im Unterschied zum stationären Ansatz kein eindeutiger kausaler Zusammenhang zwischen der Anströmung und der Entstehung des Luftwiderstands entsteht. Entsprechend erfordert die Untersuchung des Einflusses auf die Aerodynamik des Nutzfahrzeugs nicht nur eine Analyse des Gesamtluftwiderstands, sondern

auch dessen zeitlicher Entwicklung, des Übertragungsverhaltens und der Betrachtung der Auswirkung der instationären aerodynamischen Kräfte auf die unterschiedlichen Fahrzeugbereiche.

Die Abbildung der instationären Windverhältnisse anhand des charakteristischen Messsignals kennzeichnet sich durch eine zeitabhängige und über den Querschnitt homogene Geschwindigkeitsverteilung. Es zeigt sich, dass die aerodynamische Auswirkung der vorgegebenen Anströmung durch die tieffrequenten Strömungsanteile dominiert ist und, dass das Fahrzeug auf die turbulenten Eigenschaften der jeweiligen Strömungssituation sensitiv reagiert. Die Abweichung des durchschnittlichen Luftwiderstandsbeiwertes dieses Ansatzes zum Fahrversuchsergebnis beträgt nach **Tabelle 6.1** 6,9 %.

Die Mann-Methode und die „Upstream Turbulence“-Funktion von PowerFLOW® ermöglichen die Modellierung des natürlichen Windes mithilfe berechneter Geschwindigkeitsfluktuationen. Die vorgegebenen räumlichen Fluktuationen der Geschwindigkeit verursachen eine Verstärkung der dissipativen Strömungsphänomene in den repräsentativen Fahrzeugbereichen. Dabei zeigt die Mann-Methode ein vergleichbares Verhalten unter den verschiedenen Strömungssituationen wie das charakteristische Messsignal. Die durchschnittliche Abweichung zu dem im Fahrversuch ermittelten Luftwiderstand beträgt ca. 8,5 %. Andererseits weisen die Ergebnisse der „Upstream Turbulence“-Funktion eine hohe Abweichung zum Fahrversuchsergebnis auf und reagieren wenig sensitiv auf die Strömungssituation. In diesem Zusammenhang können aufgrund fehlender Kenntnisse bezüglich der hinterlegten Fluktuationenfelder keine weiteren Schlüsse daraus gezogen werden.

Die kleinste Abweichung zum Luftwiderstandsbeiwert im Fahrversuch ergibt sich bei der Anwendung des hybriden Verfahrens. Diese beträgt 4,1 % und deutet auf die synergetischen Effekte der Kombination der Anströmverfahren hin. Die Überlagerung des charakteristischen Messsignals mit den Fluktuationenfeldern der Mann-Methode sorgt für eine Anströmung, die tief- und hochfrequente Strömungsanteile sowie die erwarteten räumlichen Fluktuationen beinhaltet.

Die anhand der in Kapitel 3.3.1 analysierten Fahrversuche definierten Strömungssituationen, *Fahrversuchstag 2* und *Fahrversuchstag 3*, stellen deutlich unterschiedliche Windverhältnisse dar. Die untersuchten instationären Anströmverfahren zur Modellierung des natürlichen Windverhältnisses erlauben, abgesehen von der „Upstream Turbulence“-Funktion, im Allgemeinen eine korrekte Abbildung der unterschiedlichen Strömungssituationen in der numerischen Strömungssimulation. Entsprechend zeigt sich die aerodynamische Fahrzeugreaktion sensitiv auf die Strömungssituation und deren turbulenten Eigenschaften. In diesem Zusammenhang

und wie aus **Abbildung 6.3** zu entnehmen ist, stellt sich die Differenz des Luftwiderstands zwischen Strömungssituationen der jeweiligen Ansätze vergleichbar mit der Streubreite der im Fahrversuch ermittelten Beiwerte dar.



## 7 Schlussfolgerung und Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die aerodynamischen Eigenschaften von Nutzfahrzeugen unter instationären Windverhältnissen sowie der Einfluss der Strömungssituation auf die instationären Kräfte anhand der Analyse zahlreicher Fahrversuchsergebnisse und numerischer Strömungssimulation untersucht.

Um das instationäre Verhalten eines Nutzfahrzeugs unter natürlichen Windverhältnissen zu untersuchen, wurde die Strömungssituation charakterisiert, die ein schweres Nutzfahrzeug im Fahrversuch anhand der CST-Fahrversuchsprozedur nach Verordnung (EU) 2017/2400 erfährt. Die während des Fahrversuchs aufgenommenen Messdaten dienen nicht nur VECTO Air Drag zur Berechnung des Luftwiderstandsbeiwertes. Sie beinhalten darüber hinaus Informationen sowohl zur Windrichtung und -stärke als auch über die inhärenten Einflüsse der Topografie, des Bewuchses und der Bebauung auf der Messstrecke. Die Charakterisierung der Strömungssituation impliziert somit eine Beschreibung der Anströmung, welche auf einem konkreten Prüfgelände zu erwarten ist. Entsprechend wurde in MATLAB® ein vollständiger und automatisierter Prozess implementiert, der die Auswertung und Analyse zahlreicher Fahrversuche ermöglichte. Alle Fahrversuche haben gemeinsam, dass sie auf dem Dekra Prüfgelände in Klettwitz stattfanden und jeweils mit zwei unterschiedlichen Prüffahrzeugen der Firma MAN Truck&Bus durchgeführt wurden. Die dabei gewonnene Charakterisierung der Anströmsituation und der turbulenten Eigenschaften der Strömung im Fahrversuch weisen eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen anderer Autoren auf.

Da es sich bei der vorliegenden Arbeit in erster Linie um den Einfluss der Abbildung natürlicher Windverhältnisse in der numerischen Strömungssimulation und dessen Vergleich mit Fahrversuchsergebnisse handelt, sind die Kenntnisse über die Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwertes anhand VECTO Air Drag von besonderer Bedeutung. In diesem Zusammenhang wurde die von VECTO Air Drag dokumentierte Vorgehensweise in MATLAB® implementiert und die Annahmen, die Korrekturen sowie das Vorgehen zur Ermittlung der Beiwerte entsprechend ausführlich analysiert.

Die in dieser Arbeit durchgeführten numerischen Untersuchungen haben die Größenordnung der zu beobachtenden Strömungsphänomene aufgrund der berücksichtigten natürlichen Windverhältnisse und deren Auswirkung auf die Aerodynamik des Nutzfahrzeugs aufgezeigt. Hierfür wurden verschiedene Ansätze zur Abbildung realitätsnaher Anströmungen verwendet, die durch die Anströmrandbedingungen in der numerischen Untersuchung vorgegeben wurden. Die Betrachtung der Windverhältnisse als ein stationäres Ereignis stellt einen vereinfachter Ansatz dar, bei dem stationäre Schräganströmungen, die auf durchschnittliche Windbedingungen aus dem Fahrversuch basieren, derartige Anströmungen modellieren lassen. Die Anwendung

dieses Ansatzes bedeutet eine deutliche Zunahme des Luftwiderstandsbeiwerts im Vergleich zu einer idealen Anströmung. Die Abweichung zum Fahrversuchsergebnis bleibt jedoch signifikant groß. Aufgrund der vereinfachten Abbildung des Windverhaltens ist dieser Ansatz nur begrenzt zulässig und sollte nicht für Design- oder Optimierungszwecke bevorzugt werden.

Zur Abbildung der natürlichen Windverhältnisse in der Strömungssimulation anhand einer instationären Anströmung wurden vier unterschiedliche Modellierungsmöglichkeiten untersucht. Diese stammen aus zwei Hauptverfahren, die sich hinsichtlich der Modellierung der vorgegebenen Anströmtopologie unterscheiden. Einerseits kann ein aus dem Fahrversuch repräsentatives Messsignal bearbeitet und über den Querschnitt der Simulationsdomain vorgegeben werden, hier als charakteristisches Messsignal bezeichnet. Andererseits lassen sich die natürlichen Merkmale des Windes in Form von Geschwindigkeitsfluktuationfeldern modellieren, die in der numerischen Strömungssimulation einer Hauptströmung überlagert werden. Zur Erzeugung dieser instationären Anströmung wurden dabei die Mann-Methode und die in Simulia PowerFLOW® integrierte „Upstream Turbulence“-Funktion verwendet. Über das zweitgenannte Verfahren sind nur wenig Informationen bezüglich der angewandten Modellierung verfügbar. Die Mann-Methode sowie der Ansatz des charakteristischen Messsignals wurden in MATLAB® implementiert und eingehend betrachtet. Für alle numerischen Berechnungen wurde der Strömungslöser Simulia PowerFLOW® verwendet.

Aus den in dieser Arbeit vorgestellten numerischen Untersuchungen geht hervor, dass die verwendeten Anströmverfahren aufgrund der zeitabhängigen vorgegebenen Strömungstopologie einen höheren energetischen Zustand der Anströmung hervorrufen. Dieser fördert die Energieverluste in der Strömung und steigert die Luftwiderstandseffekte in den unterschiedlichen Bereichen des Nutzfahrzeugs, was sich in den am Fahrzeug agierenden instationären Kräften widerspiegelt. Es konnte gezeigt werden, dass die tief- und hochfrequenten Strömungsanteile einen wesentlichen Einfluss auf die aerodynamische Fahrzeugreaktion haben. Zudem weisen die Anströmverfahren des charakteristischen Messsignals und der Mann-Methode trotz grundlegender unterschiedlicher Abbildung der Anströmung eine vergleichbare Auswirkung auf den resultierenden Luftwiderstandsbeiwert auf.

Um genaue Kenntnisse über die Prognosegüte und Sensitivität der verwendeten Anströmverfahren zur Abbildung der instationären Anströmung in der Strömungssimulation zu erzielen, wurden jeweils zwei unterschiedliche Strömungssituationen aus dem Fahrversuch untersucht, die unter deutlich unterschiedlichen Windverhältnissen stattfanden. Dadurch konnte gezeigt werden, dass die Ergebnisse der unterschiedlichen Anströmverfahren, abgesehen von denen die auf der „Upstream Turbulence“-Funktion basieren, eine vergleichbar ähnliche

aerodynamische Fahrzeugreaktion in Bezug auf die turbulenten Eigenschaften der Anströmung aufweisen. In diesem Zusammenhang beträgt die Abweichung des charakteristischen Messsignals und der Mann-Methode zum Fahrversuchsergebnis jeweils 6,9 % und 8,5 %. Die Anwendung des hybriden Verfahrens sorgt für eine weitere Reduktion der Abweichung zum Luftwiderstandsbeiwert im Fahrversuch auf bis ca. 4,1 %. Darüber hinaus ist die Größenordnung der Streubreite aufgrund der abgebildeten Strömungssituation der numerisch gewonnenen Ergebnisse vergleichbar mit der Streuung der im Fahrversuch ermittelten Luftwiderstandsbeiwerte.

Aus diesen Gründen sollte, um den bei Straßenfahrt unter dem Einfluss des natürlichen Winds auftretenden Luftwiderstand korrekt in der numerischen Strömungssimulation zu bestimmen, auch die hier vorgestellte Abbildung der instationären Anströmbedingungen berücksichtigt werden. Die Implementierung dieser Anströmverfahren in den Entwicklungsprozess des gesamten Nutzfahrzeugs kann durch die Modellierung turbulenter Strömungsmerkmale ermöglichen, bereits in frühen Entwicklungsstadien näher an die realen aerodynamischen Beiwerte zu gelangen. Dabei ist allerdings zu beachten, dass diese mit einem hohen Entwicklungs- und Rechenaufwand sowie mit gewissen Hardware-Einschränkungen verbunden ist. Das bedeutet, dass zu der Komplexität der Programmierung der vorgestellten Verfahren und dem entsprechenden Entwicklungsaufwand auch erhebliche Rechenkapazitäten berücksichtigt werden müssen. Grund dafür ist die Notwendigkeit, ein ausreichend langes Zeitfenster zu betrachten, um die Anströmsituation im Fahrversuch darstellen zu können.

Die gewonnenen Erkenntnisse und entwickelten Verfahren bieten Potential für weitere Untersuchungen. Hierbei sollten weitere Fahrzeugkonfigurationen und geometrische Variationen, wie beispielsweise durch das Anbringen von aerodynamischen Maßnahmen, im Kontext der instationären Anströmung betrachtet werden. Darüber hinaus wurde der Vergleich mit den dazugehörigen Fahrversuchen dazu dienen eine konkretere Aussage hinsichtlich der Übertragbarkeit sowie der Vorhersagegenauigkeit formulieren zu können. Dabei sollten die zusätzlichen Fahrversuche die statistische Grundlage zur Definition der Strömungssituation im Fahrversuch erweitern und ein besseres Verständnis zur Reproduzierbarkeit der Messergebnisse sowie zur Streubreite der anhand VECTO Air Drag ermittelten Luftwiderstandsbeiwerte ermöglichen.

## 8 Literatur

- [1] Europäische Union, "Verordnung (EU) 2019/1242 des europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2019," 2019.
- [2] Peiró Frasquet, C. and Indinger, T., "Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwerts von realen Nutzfahrzeugen im Fahrversuch und Vergleich verschiedener Verfahren zur numerischen Simulation," *Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.*, 2017.
- [3] Bendat, J.S. and Piersol, A.G., "Engineering applications of correlation and spectral analysis," 2nd ed., John Wiley & Sons, New York, ISBN 978-0-471-57055-4, 1993.
- [4] Bendat, J.S. and Piersol, A.G., "Random data: Analysis and measurement procedures," Wiley series in probability and statistics, 4th ed., Wiley, Hoboken, N.J., ISBN 978-0-470-24877-5, 2010.
- [5] Stoll, D., "Ein Beitrag zur Untersuchung der aerodynamischen Eigenschaften von Fahrzeugen unter böigem Seitenwind," Wissenschaftliche Reihe Fahrzeugtechnik Universität Stuttgart, Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, ISBN 978-3-658-21545-3, 2018.
- [6] Nicholas Oettle, "The Effects of Unsteady On-Road Flow Conditions on Cabin Noise," Dissertation, School of Engineering and Computing Sciences, Durham, 2013.
- [7] Charalampos Kounenis, "Effects of Wind-Tunnel Simulation of On-Road Conditions," 2018.
- [8] ESDU 74030, "Characteristics of atmospheric turbulence near the ground. Part I: definitions and general information.," 1976.
- [9] Schröck, D., "Eine Methode zur Bestimmung der aerodynamischen Eigenschaften eines Fahrzeugs unter böigem Seitenwind," Zugl.: Stuttgart, Univ., Diss., 2011, Schriftenreihe des Instituts für Verbrennungsmotoren und Kraftfahrwesen der Universität Stuttgart, vol. 60, Expert-Verl., Renningen, ISBN 978-3-8169-3147-8, 2012.
- [10] Cooper, K.R. and Watkins, S., "The Unsteady Wind Environment of Road Vehicles, Part One: A Review of the On-road Turbulent Wind Environment," doi:[10.4271/2007-01-1236](https://doi.org/10.4271/2007-01-1236).
- [11] Wordley, S. and Saunders, J.W. (eds.), "On-road Turbulence," vol. 1, 2009.
- [12] Wordley, S. and Saunders, J.W. (eds.), "On-road Turbulence: Part 2," vol. 2, 2009.
- [13] McAuliffe, B.R., "Improving the aerodynamic efficiency of heavy duty vehicles: wind tunnel test results of trailer-based drag-reduction technologies," doi:[10.4224/21275397](https://doi.org/10.4224/21275397).
- [14] McAuliffe, B.R., D'Auteuil, A., and Souza, F. de, "Aerodynamic testing of drag reduction technologies for HDVs: progress toward the development of a flow treatment system (year 2) version for public release," doi:[10.4224/23000643](https://doi.org/10.4224/23000643).

- [15] Stoll, D., "Ein Beitrag zur Untersuchung der aerodynamischen Eigenschaften von Fahrzeugen unter böigem Seitenwind," Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 2018.
- [16] "PowerFLOW User's Guide," Release 5.5, 2018.
- [17] Chen, H., Teixeira, C., and Molvig, K., "Digital Physics Approach to Computational Fluid Dynamics: Some Basic Theoretical Features," *Int. J. Mod. Phys. C* 08(04):675–684, 1997, doi:[10.1142/S0129183197000576](https://doi.org/10.1142/S0129183197000576).
- [18] Succi, S. (ed.), "The lattice Boltzmann equation: For fluid dynamics and beyond," Oxford science publications, Univ. Press, Oxford, ISBN 978-0199679249, 2013.
- [19] Versteeg, H.K. and Malalasekera, W. (eds.), "An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method," 2nd ed., Pearson/Prentice Hall, Harlow, ISBN 9780131274983, 2007.
- [20] Jayanti, S., "Computational fluid dynamics for engineers and scientists," Springer, Dordrecht, The Netherlands, ISBN 978-94-024-1217-8, 2018.
- [21] Peiró Frasquet, C. and Indinger, T., "Numerische Untersuchungen zur Aerodynamik von Nutzfahrzeugkombinationen bei realitätsnahen Fahrbedingungen unter Seitenwindeinfluss," *Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.*, 2013.
- [22] Peiró Frasquet, C. and Indinger, T., "Schwere Nutzfahrzeugkonfigurationen unter Einfluss realitätsnaher Anströmbedingungen," *Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V.* 281, 2014.
- [23] Stoll, D., Schoenleber, C., Wittmeier, F., Kuthada, T. et al., "Investigation of Aerodynamic Drag in Turbulent Flow Conditions," *SAE Int. J. Passeng. Cars – Mech. Syst.* 9(2):733–742, 2016, doi:[10.4271/2016-01-1605](https://doi.org/10.4271/2016-01-1605).
- [24] Stoll, D., Kuthada, T., and Wiedemann, J., "Experimental and Numerical Investigation of Aerodynamic Drag in Turbulent Flow Conditions," *Institution of Mechanical Engineers (IMechE)*:173–187, 2016.
- [25] Zhivko Nikolov, "Effect of upstream turbulence on truck aerodynamics," Examensarbeit, Universität Linköping, Linköping, 2017.
- [26] Felipe Rodríguez, "Fuel Consumption Simulation of HDVs in the EU: Comparisons and Limitations," 2018.
- [27] Europäische Union, "Verordnung (EU) 2017/2400 der Kommission zur Durchführung der Verordnung (EG) Nr. 595/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates hinsichtlich der Bestimmung der CO<sub>2</sub>-Emissionen und des Kraftstoffverbrauchs von schweren Nutzfahrzeugen sowie zur Änderung der Richtlinie 2007/46/EG des Europäischen Parlaments und des Rates sowie der Verordnung (EU) Nr. 582/2011 der Kommission," 2017.
- [28] Oscar Delgado, Felipe Rodríguez, Nikiforos Zacharof, "Comparison of Aerodynamic Drag Determination Procedures for HDV CO<sub>2</sub> Certification," Briefing. *The International Council on Clean Transportation (ICCT)*, 2019.
- [29] Martin Rexeis, Martin Dippold, Konstantinos Anagnostopoulos, "VECTO Air Drag V3.1.0: User Manual," *EUROPEAN COMMISSION DG CLIMA*, 2017.
- [30] Rodriguez, J.F., Delgado, O., Demirgok, B., Baki, C. et al., "Heavy-Duty Aerodynamic Testing for CO<sub>2</sub> Certification: A Methodology Comparison," doi:[10.4271/2019-01-0649](https://doi.org/10.4271/2019-01-0649).

- 
- [31] Jakob Mann, "The spatial structure of neutral atmospheric surface-layer turbulence," *Journal of Fluid Mechanics*(Vol. 273):141–168, 1994.
- [32] Jakob Mann, "Wind field simulation," *Probabilistic Engineering Mechanics*(Vol. 13):269–282, 1998.
- [33] Jakob Mann, "Atmospheric turbulence," Technische Universität Dänemark, Roskilde, 2012.
- [34] Simulia, "PowerCASE User's Guide," Release 5.5, 2018.
- [35] Duncan, B., D'Alessio, L., Gargoloff, J., and Alajbegovic, A., "Vehicle aerodynamics impact of on-road turbulence," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering* 231(9):1148–1159, 2017, doi:[10.1177/0954407017699710](https://doi.org/10.1177/0954407017699710).
- [36] Schütz, T. (ed.), "Hucho - Aerodynamik des Automobils: Strömungsmechanik, Wärmetechnik, Fahrdynamik, Komfort," ATZ/MTZ-Fachbuch, 6th ed., Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN 978-3-8348-2316-8, 2013.

# Anhang

## A.1 Fluideigenschaften

Tabelle A.1 Fluideigenschaften und initiale Bedingungen

Charakteristischer Druck	101325 Pa
Charakteristische Temperatur	20°C
Charakteristische Viskosität	$1,49 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$
Charakteristische Geschwindigkeit	27,1 m/s
Turbulente Intensität	0,01%
Turbulente Länge	5 mm

## A.2 „Upstream Turbulence“-Funktion vom PowerFLOW®

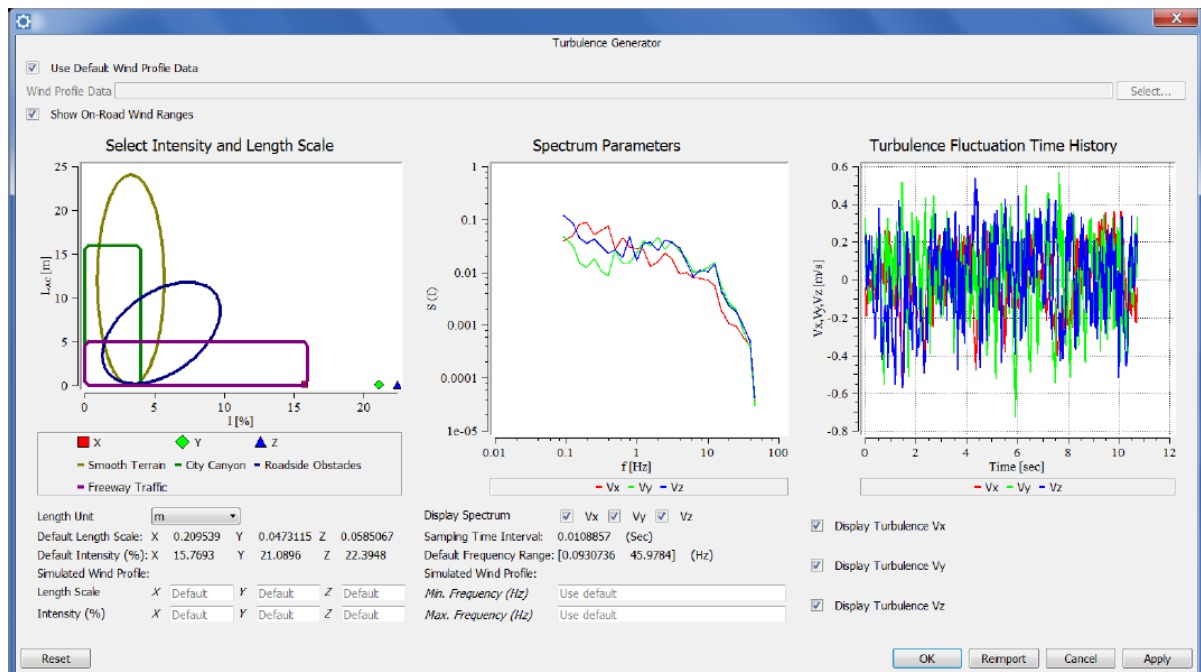
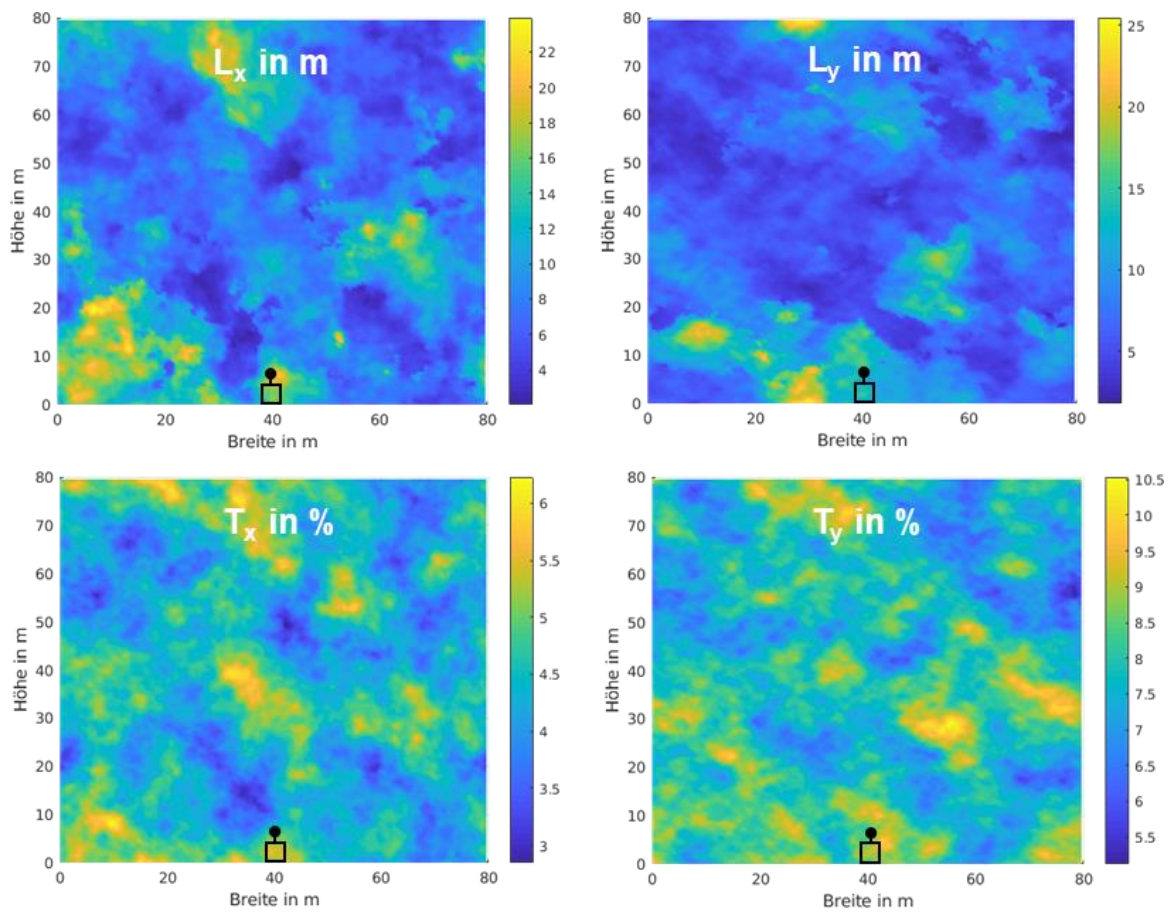


Abbildung A.1 Oberfläche der „Upstream Turbulence“-Funktion [34]

### A.3 Turbulenzgrößen anhand der Mann-Methode



**Abbildung A.2** Längenskala und turbulente Intensität der longitudinalen (links) und lateralen (rechts) Anströmkomponenten zur Abbildung der Strömungssituation *Fahrversuch T3*



## A.4 Fahrzeugeinfluss

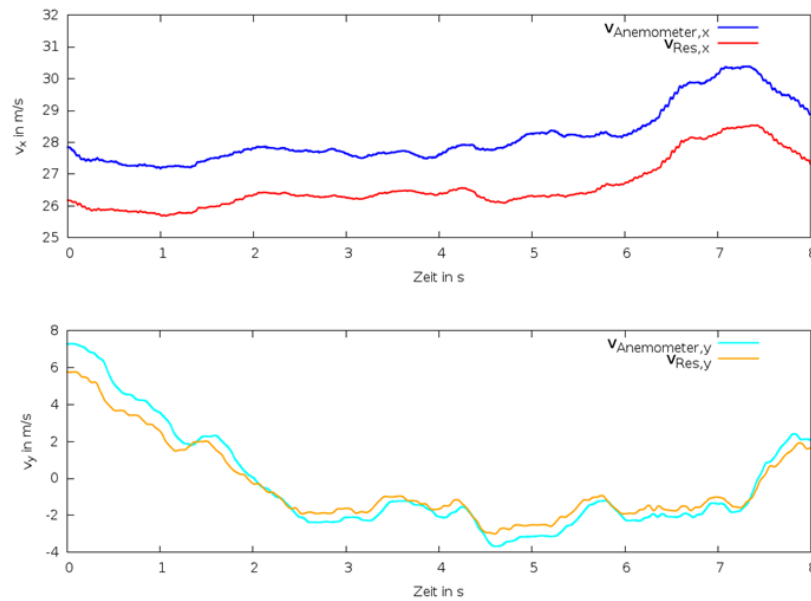


Abbildung A.3 Charakteristisches Messsignal *inst\_T3*: Übertragungsverhalten zwischen vorgegebener Anströmung ( $v_{Res}$ ) und der Geschwindigkeit am virtuellen Anemometer ( $v_{Anemometer}$ )

## A.5 Zeitliche Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts

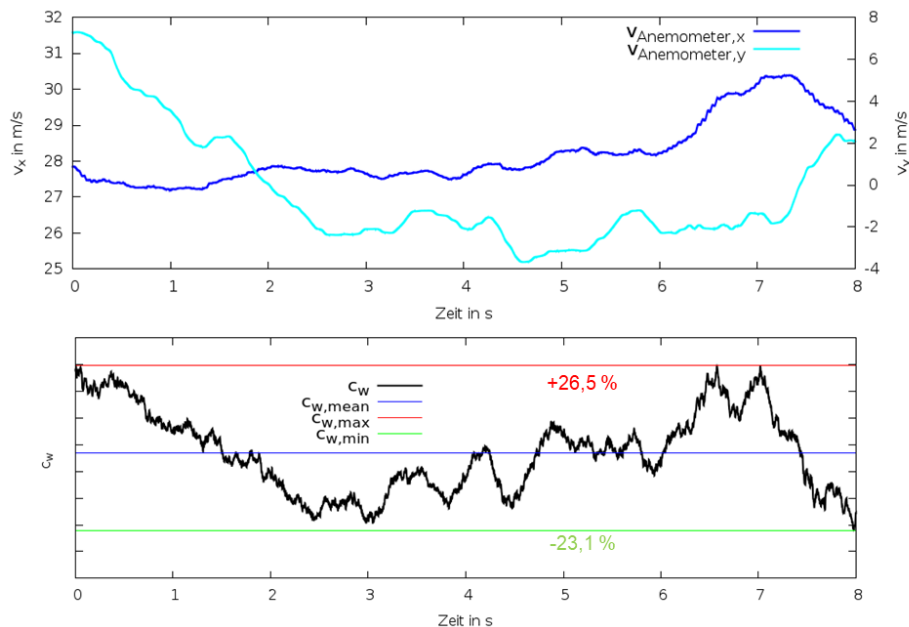
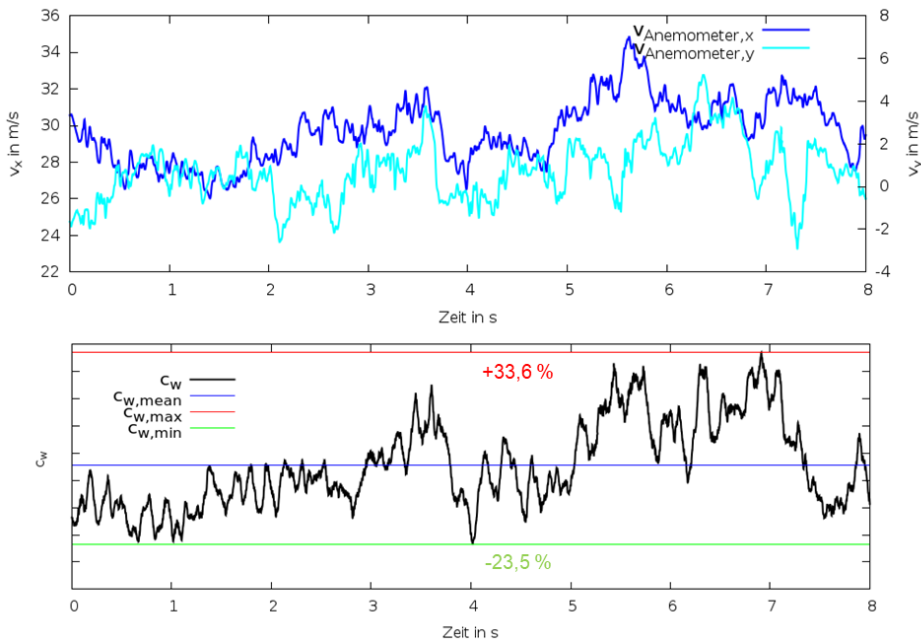
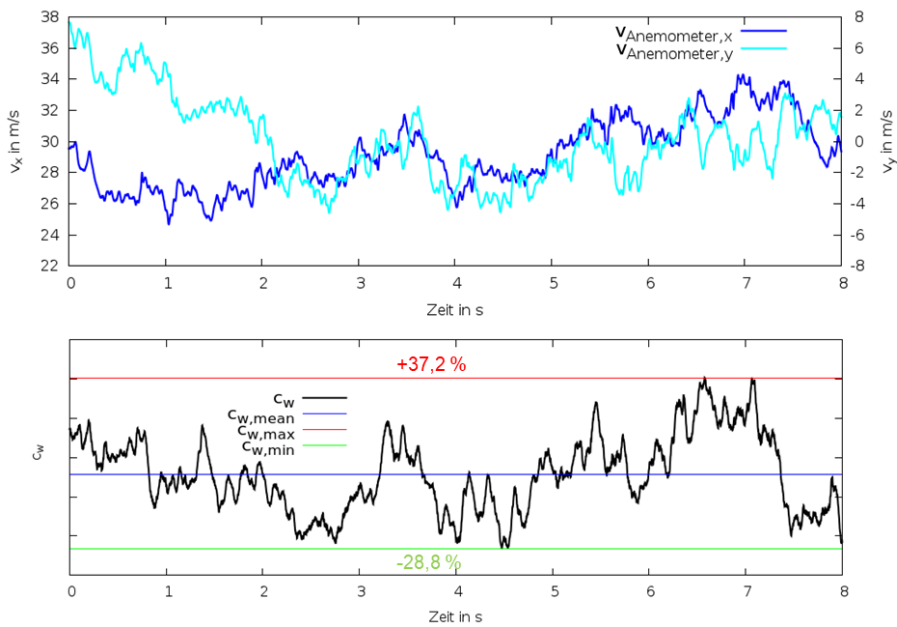


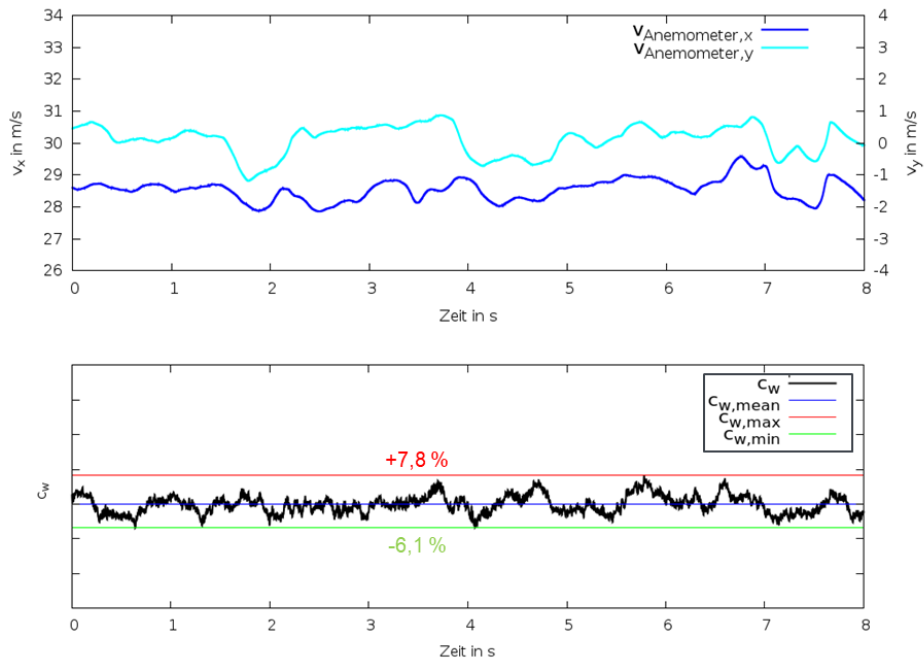
Abbildung A.4 Charakteristisches Messsignal *inst\_T3*: Zeitliche Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts und Geschwindigkeit am virtuellen Anemometer



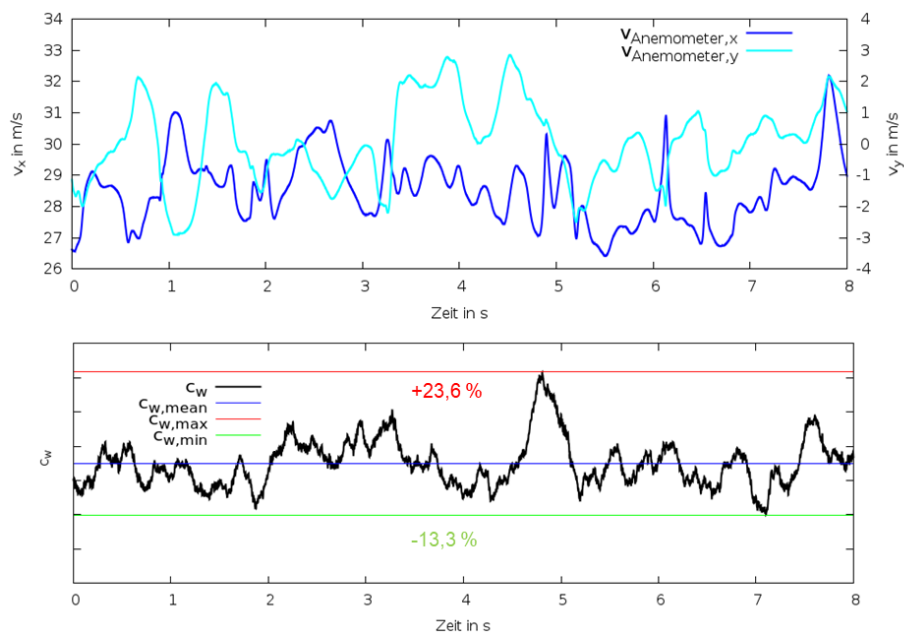
**Abbildung A.5** Mann-Methode *MM\_T3*: Zeitliche Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts und Geschwindigkeit am virtuellen Anemometer



**Abbildung A.6** Hybrides Verfahren *KMB\_T3*: Zeitliche Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts und Geschwindigkeit am virtuellen Anemometer



**Abbildung A.7** Upstream Turbulence  $UT\_T2$ : Zeitliche Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts und Geschwindigkeit am virtuellen Anemometer



**Abbildung A.8** Upstream Turbulence  $UT\_T3$ : Zeitliche Entwicklung des Luftwiderstandsbeiwerts und Geschwindigkeit am virtuellen Anemometer

## Bisher in der FAT-Schriftenreihe erschienen (ab 2014)

Nr.	Titel
263	Laserstrahlschweißen von Stahl an Aluminium mittels spektroskopischer Kontrolle der Einschweißtiefe und erhöhter Anbindungsbreite durch zweidimensional ausgeprägte Schweißnähte, 2014
264	Entwicklung von Methoden zur zuverlässigen Metamodellierung von CAE Simulations-Modellen, 2014
265	Auswirkungen alternativer Antriebskonzepte auf die Fahrdynamik von PKW, 2014
266	Entwicklung einer numerischen Methode zur Berücksichtigung stochastischer Effekte für die Crashsimulation von Punktschweißverbindungen, 2014
267	Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 1, 2014
268	Bewegungsverhalten von Fußgängern im Straßenverkehr - Teil 2, 2014
269	Schwingfestigkeitsbewertung von Schweißnahtenden MSG-geschweißter Feinblechstrukturen aus Aluminium, 2014
270	Physiologische Effekte bei PWM-gesteuerter LED-Beleuchtung im Automobil, 2015
271	Auskunft über verfügbare Parkplätze in Städten, 2015
272	Zusammenhang zwischen lokalem und globalem Behaglichkeitsempfinden: Untersuchung des Kombinationseffektes von Sitzheizung und Strahlungswärmeübertragung zur energieeffizienten Fahrzeugklimatisierung, 2015
273	UmCra - Werkstoffmodelle und Kennwertermittlung für die industrielle Anwendung der Umform- und Crash-Simulation unter Berücksichtigung der mechanischen und thermischen Vorgeschichte bei hochfesten Stählen, 2015
274	Exemplary development & validation of a practical specification language for semantic interfaces of automotive software components, 2015
275	Hochrechnung von GIDAS auf das Unfallgeschehen in Deutschland, 2015
276	Literaturanalyse und Methodenauswahl zur Gestaltung von Systemen zum hochautomatisierten Fahren, 2015
277	Modellierung der Einflüsse von Porenmorphologie auf das Versagensverhalten von Al-Druckgussteilen mit stochastischem Aspekt für durchgängige Simulation von Gießen bis Crash, 2015
278	Wahrnehmung und Bewertung von Fahrzeugaußengeräuschen durch Fußgänger in verschiedenen Verkehrssituationen und unterschiedlichen Betriebszuständen, 2015
279	Sensitivitätsanalyse rollwiderstandsrelevanter Einflussgrößen bei Nutzfahrzeugen – Teil 3, 2015
280	PCM from iGLAD database, 2015
281	Schwere Nutzfahrzeugkonfigurationen unter Einfluss realitätsnaher Anströmbedingungen, 2015
282	Studie zur Wirkung niederfrequenter magnetischer Felder in der Umwelt auf medizinische Implantate, 2015
283	Verformungs- und Versagensverhalten von Stählen für den Automobilbau unter crashartiger mehrachsiger Belastung, 2016
284	Entwicklung einer Methode zur Crashsimulation von langfaserverstärkten Thermoplast (LFT) Bauteilen auf Basis der Faserorientierung aus der Formfüllsimulation, 2016
285	Untersuchung des Rollwiderstands von Nutzfahrzeugreifen auf realer Fahrbahn, 2016

- 286  $\chi$ MCF - A Standard for Describing Connections and Joints in the Automotive Industry, 2016
- 287 Future Programming Paradigms in the Automotive Industry, 2016
- 288 Laserstrahlschweißen von anwendungsnahen Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2016
- 289 Untersuchung der Bewältigungsleistung des Fahrers von kurzfristig auftretenden Wiederübernahmesituationen nach teilautomatischem, freihändigem Fahren, 2016
- 290 Auslegung von geklebten Stahlblechstrukturen im Automobilbau für schwingende Last bei wechselnden Temperaturen unter Berücksichtigung des Versagensverhaltens, 2016
- 291 Analyse, Messung und Optimierung des Ventilationswiderstands von Pkw-Rädern, 2016
- 292 Innenhochdruckumformen laserstrahlgelöteter Tailored Hybrid Tubes aus Stahl-Aluminium-Mischverbindungen für den automobilen Leichtbau, 2017
- 293 Filterung an Stelle von Schirmung für Hochvolt-Komponenten in Elektrofahrzeugen, 2017
- 294 Schwingfestigkeitsbewertung von Nahtenden MSG-geschweißter Feinbleche aus Stahl unter kombinierter Beanspruchung, 2017
- 295 Wechselwirkungen zwischen zyklisch-mechanischen Beanspruchungen und Korrosion: Bewertung der Schädigungsäquivalenz von Kollektiv- und Signalformen unter mechanisch-korrosiven Beanspruchungsbedingungen, 2017
- 296 Auswirkungen des teil- und hochautomatisierten Fahrens auf die Kapazität der Fernstraßeninfrastruktur, 2017
- 297 Analyse zum Stand und Aufzeigen von Handlungsfeldern beim vernetzten und automatisierten Fahren von Nutzfahrzeugen, 2017
- 298 Bestimmung des Luftwiderstandsbeiwertes von realen Nutzfahrzeugen im Fahrversuch und Vergleich verschiedener Verfahren zur numerischen Simulation, 2017
- 299 Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen, 2017
- 300 Thermisches Rollwiderstandsmodell für Nutzfahrzeugreifen zur Prognose fahrprofilspezifischer Energieverbräuche, 2017
- 301 The Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter in Ambient Air, 2017
- 302 Design Paradigms for Multi-Layer Time Coherency in ADAS and Automated Driving (MULTIC), 2017
- 303 Experimentelle Untersuchung des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit von Scheiben auf die Kondensatbildung, 2017
- 304 Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter realen Umgebungsbedingungen, 2018
- 305 Simulationsgestützte Methodik zum Entwurf intelligenter Energiesteuerung in zukünftigen Kfz-Bordnetzen, 2018
- 306 Einfluss der Kantenbearbeitung auf die Festigkeitseigenschaften von Stahl-Feinblechen unter quasistatisch und schwingender Beanspruchung, 2018
- 307 Fahrerspezifische Aspekte beim hochautomatisierten Fahren, 2018
- 308 Der Rollwiderstand von Nutzfahrzeugreifen unter zeitvarianten Betriebsbedingungen, 2018
- 309 Bewertung der Ermüdungsfestigkeit von Schraubverbindungen mit gefurchem Gewinde, 2018
- 310 Konzept zur Auslegungsmethodik zur Verhinderung des selbsttätigen Losdrehens bei Bauteilsystemen im Leichtbau, 2018
- 311 Experimentelle und numerische Identifikation der Schraubenkopfverschiebung als Eingangsgröße für eine Bewertung des selbsttätigen Losdrehens von Schraubenverbindungen, 2018

- 312 Analyse der Randbedingungen und Voraussetzungen für einen automatisierten Betrieb von Nutzfahrzeugen im innerbetrieblichen Verkehr, 2018
- 313 Charakterisierung und Modellierung des anisotropen Versagensverhaltens von Aluminiumwerkstoffen für die Crashesimulation, 2018
- 314 Definition einer „Äquivalenten Kontakttemperatur“ als Bezugsgröße zur Bewertung der ergonomischen Qualität von kontaktbasierten Klimatisierungssystemen in Fahrzeugen, 2018
- 315 Anforderungen und Chancen für Wirtschaftsverkehre in der Stadt mit automatisiert fahrenden E-Fahrzeugen (Fokus Deutschland), 2018
- 316 MULTIC-Tooling, 2019
- 317 EPHoS: Evaluation of Programming - Models for Heterogeneous Systems, 2019
- 318 Air Quality Modelling on the Contribution of Brake Wear Emissions to Particulate Matter Concentrations Using a High-Resolution Brake Use Inventory, 2019
- 319 Dehnratenabhängiges Verformungs- und Versagensverhalten von dünnen Blechen unter Scherbelastung, 2019
- 320 Bionischer LAM-Stahlleichtbau für den Automobilbau – BioLAS, 2019
- 321 Wirkung von Systemen der aktiven, passiven und integralen Sicherheit bei Straßenverkehrsunfällen mit schweren Güterkraftfahrzeugen, 2019
- 322 Unfallvermeidung durch Reibwertprognosen - Umsetzung und Anwendung, 2019
- 323 Transitionen bei Level-3-Automation: Einfluss der Verkehrsumgebung auf die Bewältigungsleistung des Fahrers während Realfahrten, 2019
- 324 Methodische Aspekte und aktuelle inhaltliche Schwerpunkte bei der Konzeption experimenteller Studien zum hochautomatisierten Fahren, 2020
- 325 Der Einfluss von Wärmeverlusten auf den Rollwiderstand von Reifen, 2020
- 326 Lebensdauerberechnung hybrider Verbindungen, 2020
- 327 Entwicklung der Verletzungsschwere bei Verkehrsunfällen in Deutschland im Kontext verschiedener AIS-Revisionen, 2020
- 328 Entwicklung einer Methodik zur Korrektur von EES-Werten, 2020
- 329 Untersuchung zu den Einsatzmöglichkeiten der Graphen- und Heuristikbasierten Topologieoptimierung zur Entwicklung von 3D-Rahmenstrukturen in Crashlastfällen, 2020
- 330 Analyse der Einflussfaktoren auf die Abweichung zwischen CFD und Fahrversuch bei der Bestimmung des Luftwiderstands von Nutzfahrzeugen, 2020

## Impressum

Herausgeber	FAT Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. Behrenstraße 35 10117 Berlin Telefon +49 30 897842-0 Fax +49 30 897842-600 <a href="http://www.vda-fat.de">www.vda-fat.de</a>
ISSN	2192-7863
Copyright	Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT) 2020

Verband der Automobilindustrie e.V. (VDA)  
Behrenstraße 35, 10117 Berlin  
[www.vda.de](http://www.vda.de)  
Twitter @VDA\_online

**VDA** | Verband der  
Automobilindustrie

Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT)  
Behrenstraße 35, 10117 Berlin  
[www.vda.de/fat](http://www.vda.de/fat)

**FAT** | Forschungsvereinigung  
Automobiltechnik