

Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden
Fakultät Maschinenbau



Diplomarbeit

Zur Erlangung des akademischen Grades
Diplomingenieur (FH)

Thema:

**Analyse und Auswertung von Unfalldatenspeicher-
Einträgen bei Zusammenstößen mit vulnerablen
Verkehrsteilnehmern**

eingereicht an der
Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden
Fachbereich Maschinenbau
Studiengang Fahrzeugtechnik

Jan Wiesenberg

20/052/01

Matr.Nr.: 48964

Betreuer:

Prof. Dr. rer. nat. Toralf Trautmann, HTW Dresden
Dr.-Ing. Michael Weyde, Büro für Unfallrekonstruktion, Berlin

Dresden, den 01.10.2024

Inhaltsverzeichnis

<i>Abkürzungsverzeichnis</i>	<i>III</i>
<i>Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole</i>	<i>V</i>
<i>Abbildungsverzeichnis</i>	<i>VII</i>
<i>Tabellenverzeichnis</i>	<i>IX</i>
1 Einleitung	1
2 Theoretische Grundlagen	5
2.1 Messtechnik und Messwerterfassung	5
2.1.1 Drehzahl- und Geschwindigkeitssensoren	5
2.1.2 Beschleunigungssensoren	7
2.1.3 Drehgeschwindigkeitssensoren	9
2.1.4 Controller Area Network-Bus	10
2.2 Charakterisierung von Fußgängerunfällen	14
2.2.1 Kollisionsarten und -abläufe	14
2.2.2 Verletzungscharakteristiken und normierte Tests	17
2.2.3 Sicherheitssysteme zur Vermeidung von Fußgängerunfällen	19
2.3 Ereignisdatenspeicher nach UN/ECE-Regelung 160	23
2.3.1 Verpflichtende und optionale Parameter	23
2.3.2 Auslösen der Datenspeicherung	24
2.3.3 Datenfilterung nach SAE J211	25
3 Erstellung eines Tools für die Auswertung	27
3.1 Konzept für die Matlab-basierte Applikation	27
3.2 Einlesen der Daten und Visualisierung	31
3.3 Berechnung der Geschwindigkeitsänderung	37
3.4 Berechnung des Rucks	38
3.5 Implementierung einer Schwellwertanpassung	39
3.6 Stapelverarbeitung mehrerer Datensätze	41

4	<i>Ergebnisse der Auswertung</i>	43
4.1	Unfalldatenspeicher der Polizei Berlin	43
4.1.1	Auswertung der Längsbeschleunigung	44
4.1.2	Auswertung der Querb beschleunigung	48
4.1.3	Vergleich Längs- und Querb beschleunigung	53
4.1.4	Auswertung der resultierenden Beschleunigung	55
4.1.5	Auswertung des Rucks	59
4.2	Crash-Versuche - VW Tiguan gegen Biofidel-Dummy	62
4.3	Auswertung der StreetProbe-Daten	70
5	<i>Fehlerbetrachtung</i>	73
6	<i>Zusammenfassung</i>	79
	<i>Literatur- und Quellenverzeichnis</i>	81
	<i>Eidesstattliche Erklärung</i>	85
	<i>Anlagenverzeichnis</i>	87

Abkürzungsverzeichnis

ABS	Antiblockiersystem
ACK	Acknowledgement (Empfangsbestätigung)
ACK Del	Acknowledgement Delimiter
ACM	Airbag Control Module (Airbag-Steuergerät)
ASIC	Application-Specific Integrated Circuit (Anwendungsspezifische integrierte Schaltung)
ASR	Antriebsschlupfregelung
BASt	Bundesanstalt für Straßenwesen
CAN	Controller Area Network
CFC	Channel Frequency Class
CFR	Code of Federal Regulations
CRC	Cyclic Redundancy Check (Übertragungssicherheit)
CRC Del	Cyclic Redundancy Check Delimiter
CSV	Comma-Separated Values - Dateiformat
CTR	Control Field (Kontrollfeld)
DIN	Deutsches Institut für Normung
DLC	Data Length Code (Länge des Datenfeldes)
EDR	Event Data Recorder (Ereignisdatenspeicher)
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
EOF	End Of Frame (Ende der Nachricht)
FFT	Fast Fourier Transform (schnelle Fourier-Transformation)
FMVSS	Federal Motor Vehicle Safety Standard
GLONASS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
HHC	Hill Hold Control (Berganfahrassistent)
HIC	Head Injury Criterion (Kopfverletzungs-Kriterium)
HF	High Frequency (Hochfrequenz)
IC	Integrated Circuit (integrierte Schaltung)
ID	Identifizier
IFS	Inter Frame Spacing (Leerlaufwartezeit)
ISO	International Organization for Standardization
Lidar	Light Detection and Ranging
LOG	Dateiformat für Protokolle
MEMS	Mikro-Elektromechanisches System
MQB	Modularer Querbaukasten bei VW
MS	Megasample
NHTSA	National Highway Traffic Safety Administration
NKW	Nutzkraftwagen

Abkürzungsverzeichnis

OMM	O berflächen- M ikro m echanik
PD	P ic D AQ (Messsystem von Dr. Steffan Datentechnik)
PKW	P ersonen k raft w agen
PLI	P edestrian L egform I mpactor (Beinprüfkörper)
PP	P edestrian P rotection (Fußgängerschutz)
PVDF	P olyvinylidenfluorid
PZT	Blei-Zirkonat-Titanat
Radar	R adio D etection and R anging
RGB	R ot/ G rün/ B lau-Farbraum
RTR	R emote T ransmission R equest (Anforderung externer Daten)
SAE	S ociety of A utomotive E ngineers
SOF	S tart O f F rame (Start der Nachricht)
SUV	S port U tility V ehicle (Stadtgeländewagen)
TEDR	T riggered E vent D ata R ecorder
ToF	T ime o f F light (Reflexions-Entfernungsmessung)
TXT	Text-Dateiformat
UDS	U nfall d atenspeicher
UN/ECE	U nited N ations E conomic C ommission for E urope (europäische Wirtschaftskommission)
WAV	W aveform Audio - Dateiformat
XLSX	Excel-Dateiformat
XML	E xtensible M arkup L anguage - Dateiformat

Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole

Zeichen	Einheit	Bedeutung
a	m/s ²	Beschleunigung
a_{res}	m/s ²	resultierende Beschleunigung
a_x	m/s ²	Beschleunigung in x-Richtung
a_y	m/s ²	Beschleunigung in y-Richtung
a_z	m/s ²	Beschleunigung in z-Richtung
$a_0; a_1; a_2$	-	Faktoren (x-Richtung) des CFC-Filter
$b_1; b_2$	-	Faktoren (y-Richtung) des CFC-Filter
$C; C_1; C_2; C_M$	F	Kapazität
CFC	-	Filterklasse des CFC-Filters
da	m/s ²	Beschleunigungsänderung
dt	s	Zeitinkrement
dv	km/h	Geschwindigkeitsänderung
da		Beschleunigungsänderung
F	N	Kraft
F_C	N	Coriolis-Kraft
f_s	Hz (S/s)	Abtastrate
g	m/s ²	Erdbeschleunigung/Schwerkrafteinheit
HIC	-	Head Injury Criterion
j	m/s ³	Ruck
j_{max}	m/s ³	maximaler Ruck
j_{mean}	m/s ³	mittlerer Ruck innerhalb von Δt
L_{Bus}	%	Buslast
m	kg	Masse
R	Ω	Widerstand
R_T	kBit/s	Übertragungsgeschwindigkeit
T	s	Periodendauer
t_{Bit}	s	Zeit je Bit
$t_{interval}$	s	Wiederholungsintervall der Nachricht
$t_{Message}$	s	Länge der Nachricht
t_0	s	Zeitpunkt des Ereignisses
t_1	s	Beginn der HIC-Berechnung
t_2	s	Ende der HIC-Berechnung
U	V	Spannung
U_{Diff}	V	Differenzspannung
U_{High}	V	Spannung der CAN-High-Leitung
U_{Low}	V	Spannung der CAN-Low-Leitung
v	m/s	Geschwindigkeit

Verzeichnis der Formelzeichen und Symbole

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$X(n); X(n-1); X(n-2)$	-	X-Wert für die CFC-Filterung
$Y(n); Y(n-1); Y(n-2)$	-	Y-Wert für die CFC-Filterung
Δa	m/s ²	Beschleunigungsänderung
Δt	s	Zeitdifferenz/-intervall
Δv	km/h	kumulierte Geschwindigkeitsänderung
Σ	-	Summe
φ	°	Drehwinkel
Ω	°/s	Drehrate
ω_a	1/s (Hz)	Grenzfrequenz
ω_d	1/s (Hz)	Grenzkreisfrequenz

Abbildungsverzeichnis

2.1: Aufbau eines Drehzahlsensors mit Hall-IC [5]	6
2.2: Messprinzipien und Anwendungsbeispiele von Beschleunigungssensoren [5]	7
2.3: Messbereiche von Beschleunigungssensoren im Automotive-Bereich [5]	7
2.4: Aufbau und Bauteile eines MEMS-Beschleunigungssensors [5]	9
2.5: Aufbau eines Schwingungsgyrometers [5]	10
2.6: Unterschied Kollisionserkennung und -vermeidung [9]	11
2.7: Unterschied High-Speed- und Low-Speed-CAN [9]	12
2.8: Aufbau einer CAN-Botschaft [9]	12
2.9: Übersicht der Abstandsbezeichnungen bei Längswurf des Fußgängers [11]	16
2.10: Übersicht über die gesetzlichen Anforderungen nach UN/ECE-R.-127 [13]	18
2.11: Umfeldsensorik und Detektionsbereiche [20]	20
2.12: Programmablaufplan des CFC-Filters (CFC_Filter_Func)	26
3.1: Konzeptansicht - Benutzeroberfläche "Darstellung"	28
3.2: Programmablaufplan Crash-Data-Evaluation	30
3.3: Programmablaufplan der Sonderzeichenprüfung (Spec_Char_Test_Func)	32
3.4: Benutzeroberfläche "Darstellung" mit 2-Achsen-Darstellung	32
3.5: Vorschlag für die definierte Ordnerstruktur der Messdaten	33
3.6: Excel-Datei zur Festlegung der Bezeichnung der verschiedenen Messkanäle	35
3.7: Implementierung eines Dropdown-Menüs zum Wechsel des Messsystems	36
3.8: Benutzeroberfläche "Berechnung"	39
4.1: maximale Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)	45
4.2: prozentuale Auswertung der Geschwindigkeitsänderung aller Datensätze in Längsrichtung (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)	46
4.3: prozentuale Auswertung der Geschwindigkeitsänderung bei Überschreiten des Schwellwerts in Längsrichtung (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)	47
4.4: maximale Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung (0,8 km/h innerhalb von 5 ms)	48
4.5: prozentuale Auswertung der Geschwindigkeitsänderung aller Datensätze in Querrichtung (0,8 km/h innerhalb von 5 ms)	49
4.6: prozentuale Auswertung der Geschwindigkeitsänderung bei Überschreiten des Schwellwerts in Querrichtung (0,8 km/h innerhalb von 5 ms)	50
4.7: maximale Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)	51
4.8: prozentuale Auswertung der Geschwindigkeitsänderung aller Datensätze in Querrichtung (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)	52
4.9: prozentuale Auswertung der Geschwindigkeitsänderung bei Überschreiten des Schwellwerts in Querrichtung (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)	52
4.10: Vergleich der Datensätze die den Schwellwert in Längs- oder Querrichtung überschreiten (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)	53

Abbildungsverzeichnis

4.11: maximale Geschwindigkeitsänderung basierend auf der resultierenden Beschleunigung (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)	55
4.12: prozentuale Auswertung der Geschwindigkeitsänderung aller Datensätze basierend auf der resultierenden Beschleunigung (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)	56
4.13: prozentuale Auswertung der Geschwindigkeitsänderung bei Überschreiten des Schwellwerts basierend auf der resultierenden Beschleunigung (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)	57
4.14: Iterative Schwellwertbestimmung mit Hilfe der Datensätze welche die Geschwindigkeitsänderung in Längs- oder Querrichtung von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms erfüllen	58
4.15: Maximaler Ruck innerhalb der interpolierten Messdaten der Datensätze	60
4.16: Iterative Schwellwertbestimmung mit Hilfe der Datensätze welche die Geschwindigkeitsänderung in Längs- oder Querrichtung von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms erfüllen	60
4.17: Lage und Abstand der Messsysteme vom Fahrzeugschwerpunkt	62
4.18: Beispiel korrigierter PicDAQ 4 (blau) Daten	63
4.19: Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung der Versuche an Tag 1 (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)	64
4.20: Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung der Versuche an Tag 2 (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)	65
4.21: Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung der Versuche an Tag 3 (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)	66
4.22: Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung der Versuche an Tag 1 (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)	67
4.23: Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung der Versuche an Tag 2 (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)	68
4.24: Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung der Versuche an Tag 3 (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)	69
4.25: Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung der StreetProbe-Versuche (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)	70
4.26: Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung der StreetProbe-Versuche (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)	71
5.1: Absolute Abweichung der interpolierten Messwerte des UDS innerhalb der Versuche mit dem Biofidel-Dummy	74
5.2: Relative Abweichung der interpolierten Messwerte des UDS innerhalb der Versuche mit dem Biofidel-Dummy	75
5.3: Relative Abweichung der interpolierten Messwerte des UDS in Bezug auf den Schwellwert bei 1171 Datensätzen der Polizei Berlin	76
5.4: Darstellung der maximalen Differenz der Maxima der Geschwindigkeitsänderungen des UDS bei den Versuchen mit dem Biofidel-Dummy	77

Tabellenverzeichnis

2.1: Übersicht über die Kollisionsarten und -abläufe eines Fußgängerunfalls [11] 15

4.1: Übersicht über die Datensätze je Jahr _____ 44

1 Einleitung

Bei nahezu jedem sechsten (15,6%) getöteten Verkehrsteilnehmer im Jahr 2023 in Deutschland handelte es sich um einen Fußgänger. Insgesamt kamen 2023 432 Fußgänger im Straßenverkehr in Deutschland zu Tode. Im direkten Vergleich des Zeitraumes zwischen Januar und November mit dem Vorjahreszeitraum zeigt sich ein Anstieg von 12,3% in dieser Kategorie [1–3].

Fußgänger sind aufgrund ihrer Vulnerabilität und ihres geringen Schutzes häufiger von schweren Verletzungen betroffen als andere Verkehrsteilnehmer. Dies liegt nicht zuletzt an der meist hohen Differenzgeschwindigkeit zwischen den kollidierenden Verkehrsteilnehmern. Durchschnittliche Schrittgeschwindigkeiten beim normalen Gehen liegen zwischen 3 und 5 km/h, während die durchschnittliche Geschwindigkeit auf den Hauptverkehrsstraßen in Dresden zuletzt rund 28 km/h betrug. Zudem kommt noch die hohe Massendifferenz der beteiligten Unfallgegner hinzu. Dies gilt nicht nur aber insbesondere für elektrisch angetriebene Fahrzeuge, die aufgrund der zusätzlichen Masse der Batterie deutlich schwerer als Fußgänger sind, so dass die Massenverhältnisse durchaus jenseits von 40:1 bei PKW-Fußgänger Kollisionen und 200:1 bei NKW-Fußgänger Unfällen liegen können [4].

Grundsätzlich stellt sich die Rekonstruktion von Fußgänger-Unfällen als schwierig heraus, denn abgesehen von Verletzungen und Schäden am Fahrzeug liegen oft nur wenige Anhaltspunkte für die Rekonstruktion der Geschwindigkeiten vor. Häufig ist selbst der Kollisionspunkt an der Unfallörtlichkeit schon nicht genau bestimmbar, weil es an diesbezüglich eindeutigen Spuren fehlt. Somit sind Wurfweiten und die nachkollisionäre Fahrzeugbewegung nicht hinreichend genau bestimmbar. Abgesehen davon basieren die Tabellen für Längs- und Querswurfweite von Fußgängern zum Großteil auf Statistiken und Versuchen aus den 1970er und 1980er Jahren. Die damaligen Fahrzeuge sind mit den heutigen Fahrzeugen nur bedingt vergleichbar.

Seither wurde viel über die Vermeidbarkeit von Fußgängerunfällen sowie Maßnahmen zur Reduzierung der Schadensschwere geforscht und entwickelt. Notbremsassistenten unterstützen heute ggf. den Fahrer bei erkannten kritischen Situationen und bremsen schon vor der Fahrerreaktion mit geringerer Verzugszeit das Fahrzeug ab. Diese Systeme arbeiten meistens radargestützt und in Kombination mit einem Kamerasystem. Sie erkennen einen Fußgänger erst als mögliches Hindernis, wenn sich dieser im entsprechenden Radarfeld befindet. Die sichere Erkennung eines Fußgängers wird seitens der Fahrzeughersteller meist schon in der Betriebsanleitung ausgeschlossen. Auch Kamerasysteme können erst auf einen erkannten und per Prädiktion geschlussfolgerten Weg eines Fußgängers reagieren. Dabei hat jedes System seine eigenen Schwachstellen. Gerade im innerstädtischen Raum ist die Funktion durch

viele mögliche Sichteinschränkungen und Unvorhersehbarkeiten nur eingeschränkt nutzbar.

Nichtsdestotrotz können kamera- und radargestützte Notbremsassistenten helfen, Unfälle mit Fußgängern zu vermeiden. Der Einfluss der Verbreitung dieser Systeme könnte sich auf Dauer in der sinkenden Anzahl der getöteten Fußgänger im Straßenverkehr zeigen [1].

Dennoch ist aufgrund der nicht vorhersehbaren Möglichkeiten unterschiedlicher Szenarien der Bewegung von Fußgängern davon auszugehen, dass es trotz aller Bemühungen zu Unfällen zwischen Fußgängern und Fahrzeugen kommen wird. Neben den materiellen Spuren, wie beispielsweise Reifenspuren, kann die Unfallrekonstruktion auch auf aufgezeichnete Daten zurückgreifen. Beispielsweise werden schon seit Mitte der 1990er-Jahren bestimmte Einsatzfahrzeuge der Polizei und Feuerwehr in manchen Bundesländern sowie Taxis und Mietwagen mit Unfalldatenspeichern ausgerüstet. Diese zeichnen kontinuierlich mehrere Messdaten im Fahrzeug auf und hinterlegen sie in einem nichtflüchtigen Speicher, sobald ein Unfall erkannt wurde. Diese sind jedoch in der Regel Zusatzmodule, welche nachträglich in das bestehende Fahrzeug eingebaut werden und sowohl Fahrdaten mittels eigener Sensorik (Beschleunigung und Gierrate) als auch vom Fahrzeug generierte Messwerte (Geschwindigkeit, Bremse, Blinker, Licht etc.) erfassen.

Als Ergänzung zu den bereits vorhandenen Sicherheitssystemen im Fahrzeug trat am 21. September 2021 die UN/ECE-Regelung Nr. 160 in Kraft. Diese umfasst eine Ergänzung der Zulassungsvoraussetzungen von Kraftfahrzeugen der Klassen M1 und N1 um den Ereignisdatenspeicher (englisch: Event-Data-Recorder, kurz: EDR).

Der EDR ist im Gegensatz zum Unfalldatenspeicher serienmäßig im Fahrzeug vorhanden, und zwar nicht als separates Bauteil, sondern in der Regel als Zusatzfunktion im Airbag-Steuergerät eingerichtet. Der EDR bietet allerdings nur einen begrenzten Funktionsumfang; erfasst werden im Wesentlichen der Verlauf der vom Fahrzeug angezeigten Tachogeschwindigkeit, Bremspedal-Betätigung [ja/nein], Fahrpedal-Betätigung [Prozent-Wert], Lenkwinkel, Aktivierung von Assistenzsystemen (ESC, ABS, Notbremsassistent, Spurhalteassistent-System etc.) über einen Zeitraum von 5 Sekunden vor der Kollision und der Verlauf der anstoßbedingten Geschwindigkeitsänderung (Δv) über 250 ms nach der Kollision. Die Funktionen und Datenaufzeichnungen sind angelehnt an die seit 2006 geltende Regelung 49 Part 563 der National Highway Transportation and Safety Behörde (NHTSA) der USA, somit wird auch der Gurtanlege-Zustand erfasst und abgespeichert. Ein speicherwürdiges Ereignis ist dabei durch das Überschreiten bestimmter Δv -Schwellwerte definiert bzw. wird durch das Auslösen eines nicht reversiblen Rückhaltesystems (Gurtstraffer, Airbag etc.) initiiert. Sind die Bedingungen für eine

Speicherung von Fahrdaten im EDR erfüllt, wird eine definierte Anzahl an Parametern in einem nicht flüchtigen Speichermedium im Fahrzeug abgelegt. Die EDR-Daten können mit Hilfe eines separaten Auslesetools - entweder herstellerspezifisch oder herstellerübergreifend (Bosch-CDR-Tool) - über die OBD-Schnittstelle oder direkt aus dem Airbag-Steuergerät ausgelesen und in dekodierter, d.h. lesbarer Form zum Beispiel als PDF abgelegt werden. Dies soll Unfallanalytikern helfen, das Fahrverhalten in den letzten 5 Sekunden vor der Kollision sowie die anstoßbedingte Geschwindigkeitsänderung genauer erfassen zu können und bei der Unfallrekonstruktion zu unterstützen. Außerdem kann durch einige Zustandswerte, wie der Bremsbetätigung oder dem ESP-Regelverhalten, sowie Parametern, wie dem Lenkwinkel, auf das Verhalten des Fahrers zum Unfallzeitpunkt sowie präkollisionär geschlossen werden. Dies lässt auch Annahmen zur Vermeidbarkeit des Unfalls zu und es können eventuelle technische Defekte als Einflussfaktoren herangezogen werden.

In dieser Diplomarbeit werden die vorgegebenen gesetzlichen Schwellwerte dahingehend untersucht, inwiefern diese ausreichend sind, Fußgängerunfälle sicher und eindeutig als Ereignis zu detektieren. Dazu wird mithilfe einer Matlab-basierten Applikation aus vorhandenen Datensätzen von Unfalldatenspeichern sowie durchgeführten Versuchen eine Auswertung erstellt, welche eine Schwellwertprüfung sowie Visualisierung ermöglichen. Anschließend kann durch Variation der Parameter geprüft werden, bis zu welchem Schwellwert eine Erkennung des Zusammenstoßes als Ereignis noch möglich ist und welchen Einfluss verschiedene Schwellwert-Kombinationen auf das Ergebnis haben. Zusätzlich sollen alternative Schwellwerte wie der Ruck oder eine kumulierte Geschwindigkeitsänderung basierend auf der resultierenden Beschleunigung betrachtet werden. Des Weiteren soll das Zeitintervall der kumulierten Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung variiert werden. Durch das kurze Zeitintervall bei gleichem Schwellwert für den Zeitpunkt des Ereignisses sind deutlich höhere Beschleunigungen in Querrichtungen notwendig, um diese Schwelle zu erreichen. Ein Vergleich mit dem gleichen Zeitintervall der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung soll mögliche Unterschiede aufzeigen.

Die Vergleiche der verschiedenen Schwellwert-Kombinationen sollen so mögliche Argumentationen zu alternativen Schwellwerten für den Zeitpunkt des Ereignisses unterstützen, um Fußgängerunfälle sicher erkennen und im EDR aufzeichnen zu können.

2 Theoretische Grundlagen

Die in diesem Abschnitt behandelten theoretischen Grundlagen umfassen die Funktionsweise und Einschränkungen der verwendeten Messtechnik, die Charakterisierungen von Fußgängerunfällen sowie die Anforderungen an den seit 07. Juli 2024 für alle neu zugelassenen Fahrzeuge der Klassen M1 und N1 verpflichtenden Ereignisdatenspeicher (engl. Event Data Recorder – kurz EDR).

2.1 Messtechnik und Messwerterfassung

Die Erfassung fahrdynamischer Daten erfolgt mit Hilfe verschiedener, im Fahrzeug verbauter, Sensoren. Zur Verarbeitung und Auswertung werden die Messdaten mit Hilfe eines Kommunikationsnetzwerkes, dem CAN-Bus, zwischen verschiedenen Steuergeräten ausgetauscht. Die nachfolgenden Kapitel beschäftigen sich mit dem Aufbau und der Funktionsweise der für diese Diplomarbeit relevanten Sensoren für Drehzahl, Geschwindigkeit und Beschleunigung sowie einem Einblick in das Kommunikationsnetzwerk des CAN-Bus. Des Weiteren werden Grenzen und Einschränkungen bei der Verarbeitung der Signale aufgezeigt und erörtert.

2.1.1 Drehzahl- und Geschwindigkeitssensoren

Mit Hilfe dieser Sensoren lässt sich die Fahrzeuggeschwindigkeit bestimmen. Sie messen vorrangig eine Drehzahl. Die Raddrehzahlsensoren ermitteln beispielsweise die Drehzahl der einzelnen Räder. Ist darüber hinaus die Strecke bekannt, die während der Drehung zurückgelegt wurde, im Falle der Raddrehzahl ist dies der dynamische Reifenabrollumfang, kann daraus die Radumfanggeschwindigkeit jedes Rades berechnet werden. Während **herkömmliche Sensoren meist passiv**, nach dem Prinzip der elektromagnetischen Induktion, arbeiteten, nutzen moderne Drehzahlsensoren das Prinzip des Hallsensors. Sie benötigen im Gegensatz zu den passiven Sensoren eine eigene Spannungsversorgung und werden deshalb als aktive Sensoren bezeichnet. Bei modernen Fahrzeugen werden für die Erfassung der Fahrzeuggeschwindigkeit die Drehzahlen der einzelnen Räder im ABS-Steuergerät ausgewertet. Der Aufbau dieser, nach dem Hallsensor-Prinzip arbeitenden, Sensoren ist in folgender Abbildung 2.1 dargestellt.

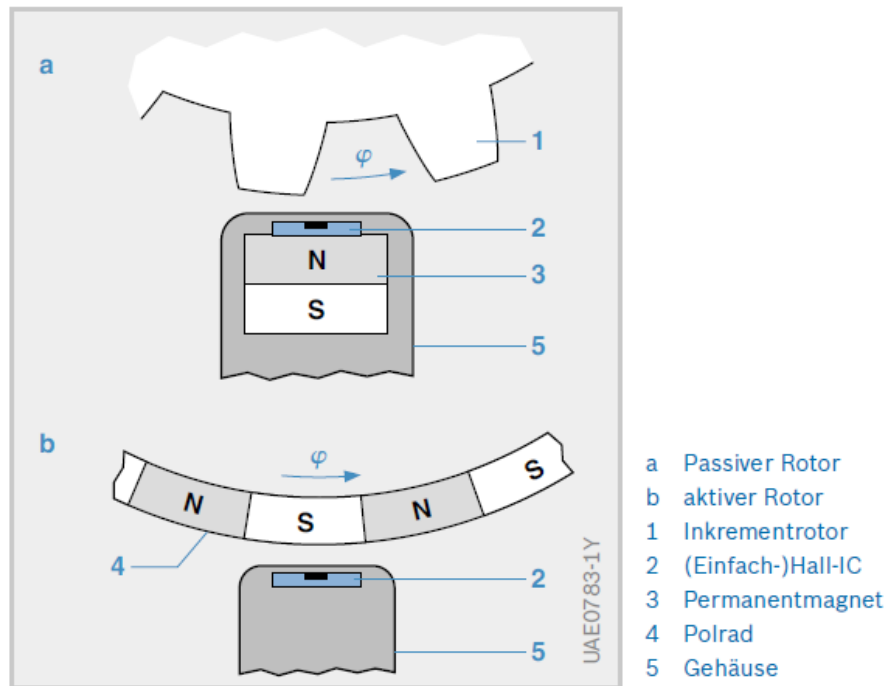


Abbildung 2.1: Aufbau eines Drehzahlsensors mit Hall-IC [5]

Der Hall-IC wird zur Messung der Drehzahl permanent von einem Strom durchflossen. Ändert sich anschließend das senkrecht auf ihn treffende Magnetfeld, wird an den Stirnflächen im rechten Winkel zum Stromfluss eine Spannung induziert. Diese Hall-Spannung wird dann von der, im Sensor integrierten, Elektronik ausgewertet und verstärkt und das resultierende Rechteck-Signal über eine separate Signalleitung ausgegeben. Im angeschlossenen Steuergerät kann die Signalspannung weiterverarbeitet und mit Hilfe eines Schwellwertkomparators die Drehzahl ermittelt werden. Neuere Sensoren nutzen einen meist aktiven Rotor und messen neben der Drehzahl auch die Drehrichtung, weshalb auf die Bewegungsrichtung des Fahrzeugs geschlussfolgert werden kann. Die Frequenz ist dabei proportional zur Radumfangsgeschwindigkeit. [5, S. 55–66]

Durch Kenntnis des dynamischen Reifenabrollumfangs lassen sich aus den ermittelten Drehzahlensignalen die jeweiligen Radumfangsgeschwindigkeiten errechnen. Diese werden von verschiedenen Systemen der Fahrdynamikregelung (ASR/ABS/ESP) genutzt und dienen bei modernen Fahrzeugen auch der Bestimmung der Fahrzeuggeschwindigkeit. Diese wird vom ESP-Steuergerät über den CAN-Bus anderen Steuergeräten, wie dem Kombiinstrument, zur Verfügung gestellt.

Alternativ wäre eine Bestimmung der Geschwindigkeit mit Hilfe eines Global Positioning Systems (GPS) möglich. Da öffentlich zugängliche GPS (GLONASS o.ä.) aber nur eine Genauigkeit von circa 10 m zulassen, sind die daraus resultierenden Geschwindigkeiten dementsprechend ungenau. Verbesserung würde ein differenzielles GPS bieten, welches auf Korrekturdaten eines Fix-Punktes zurückgreifen kann, um eine Genauigkeit von bis zu drei

Zentimetern gewährleisten zu können. Diese Systeme dienen aber, aufgrund Ihrer Abhängigkeit von einem Satellitensignal, bisher in keinem Fahrzeug als Basis zur Ermittlung der Fahrzeuggeschwindigkeit.

2.1.2 Beschleunigungssensoren

Beschleunigungssensoren werden vielseitig in Fahrzeugen eingesetzt. Sie können zum Beispiel zur Ermittlung der Aufprallbeschleunigung und dem anschließenden Auslösen von Sicherheitsrückhaltesystemen eingesetzt werden. Außerdem erfassen Sensoren nahe des Fahrzeugschwerpunktes die auf das Fahrzeug wirkenden Beschleunigungen für die Steuerung von Fahrdynamikregelsystemen (ABS/ESP). Ferner werden sie für die Erfassung von Karosseriebeschleunigungen zur Fahrwerksregelung sowie für die Klopfregelung bei Ottomotoren eingesetzt. Dabei wird die Messgröße oder der Messbereich eines Sensors häufig als ein Vielfaches der Erdbeschleunigung in „g“ ($1\text{ g} = 9,81\text{ m/s}^2$) angegeben. Auszugsweise sind einige Messbereiche von Beschleunigungssensoren in folgender Abbildung 2.3 dargestellt. Aktuelle Messsysteme der Firma Dewesoft, ähnlich den Geräten, die auch in den Versuchen mit dem Biofidel-Dummy eingesetzt wurden, ermöglichen Abtastraten von Beschleunigungssensoren mit bis zu 1 MS (Megasample) je Kanal [6, 7].

2 Messprinzipien			
Elektr. Abgriff	Prinzip	Technische Umsetzung	Anwendungsbeispiele
Piezo-resistiv	Spannungsmessung über Widerstandsänderung bei Dehnungen durch Beschleunigung auf Feder-Masse-System	Silizium-Volumenmikromechanik, Dünnschichtsysteme	Laborapplikationen, früher auch Crashsensorik
Piezo-elektrisch	Ladungsverschiebungen im Kristall durch angelegte Kraft (Feder-Masse-System)	Keramikmaterial, PZT, Quarz, PVDF	Klopfensensoren, früher auch Crashsensorik
Kapazitiv	Auslenkung des Feder-Masse-Systems wird über die Kapazitätsmessung eines Plattenkondensators bestimmt	Silizium-Volumenmikromechanik, Oberflächenmikromechanik	Flächendeckend im Kfz verwendet
Thermisch	Laterale Auslenkung eines erhitzten Gasbereichs und Detektion der Asymmetrie bezüglich der Heizzone	Volumenmikromechanik	Überrollsensierung

Abbildung 2.2: Messprinzipien und Anwendungsbeispiele von Beschleunigungssensoren [5]

1 Messbereich von Beschleunigungssensoren	
Anwendung	Messbereich
Klopfregelung	40 g
Passagierschutz	
– Airbag, Gurtstraffer	35...100 g
– Seitencrash-, Upfrontsensierung	100...400 g
– Überrolldetektion	3...7 g
ESP, HHC, ABS	0,8...1,8 g
Fahrwerkregelung (Suspension)	
– Aufbau	1 g
– Achse/Dämpfer	10...20 g
Car-Alarm	1 g

Abbildung 2.3: Messbereiche von Beschleunigungssensoren im Automotive-Bereich [5]

Die Messung der Beschleunigung entspricht eher dem Messprinzip einer Kraftmessung. Es wird die Kraft gemessen, welche durch die Beschleunigung auf eine definierte träge Masse wirkt.

$$F = m * a \quad (2.1)$$

Dabei unterscheidet man zwischen zwei verschiedenen Systemen. Bei wegmessenden Systemen wird die Masse elastisch mit dem, der Beschleunigung ausgesetzt, Körper verbunden. Bei konstanter Beschleunigung ist die Kraft gleich der Masse mal Beschleunigung sowie gleich der Federsteifigkeit mal der Auslenkung. Sobald sich die Beschleunigung verändert, wirken zusätzlich noch eine Dämpfungs- und Trägheitskraft. Für die Auslegung eines solchen Sensors sollte die Resonanzfrequenz deutlich oberhalb der zu erwartenden Schwingungsfrequenz liegen, um ein Aufschwingen zu verhindern. Durch eines der folgenden Messprinzipien wird die Auslenkung in ein elektrisches Signal umgewandelt.

Systeme, welche die mechanische Spannung messen, arbeiten nach dem piezoelektrischen Prinzip. Sobald auf das Piezoelement eine Kraft wirkt, wird durch die im Kristall wirkende mechanische Spannung eine Ladung erzeugt. Diese kann an den Elektroden der Oberfläche des Piezoelements über den nachgeschalteten Widerstand abfließen. Diese Sensoren können dementsprechend ausschließlich dynamisch messen und sind für statische Messungen ungeeignet. Sie werden unter anderem für die Auslösung von Sicherheitsrückhalteeinrichtungen eingesetzt. Das Prinzip dieser Sensoren basiert auf einem piezoelektrischen Biegebalken, welcher aufgrund seiner Eigenmasse im Falle einer Beschleunigung eine Auslenkung erfährt. Der resultierende Ladungsunterschied an der metallisierten Ober- und Unterseite des Biegebalkens wird dann zu einem Beschleunigungssignal ausgewertet. [5, S. 67–71]

Wie in der Abbildung 2.2 zu sehen ist, sind kapazitative Beschleunigungssensoren weit in der Fahrzeugtechnik verbreitet. Die häufigste Ausführung sind dabei Oberflächenmikromechanische Beschleunigungssensoren, welche oft mit OMM oder MEMS abgekürzt werden. Diese werden wie in Abbildung 2.3 zu sehen für verschiedene Messbereiche zwischen 1 g bis 400 g ausgelegt. Für die Aufprallerkennung werden die Sensoren meistens mit der Elektronik für die Signalauswertung in einem Modul zusammengefasst, welches dann im Seiten- oder Frontbereich des Fahrzeugs montiert werden kann. Der eigentliche Beschleunigungssensor besteht aus einer Silizium-Kammstruktur wie sie in nachfolgender Abbildung 2.4 dargestellt ist.

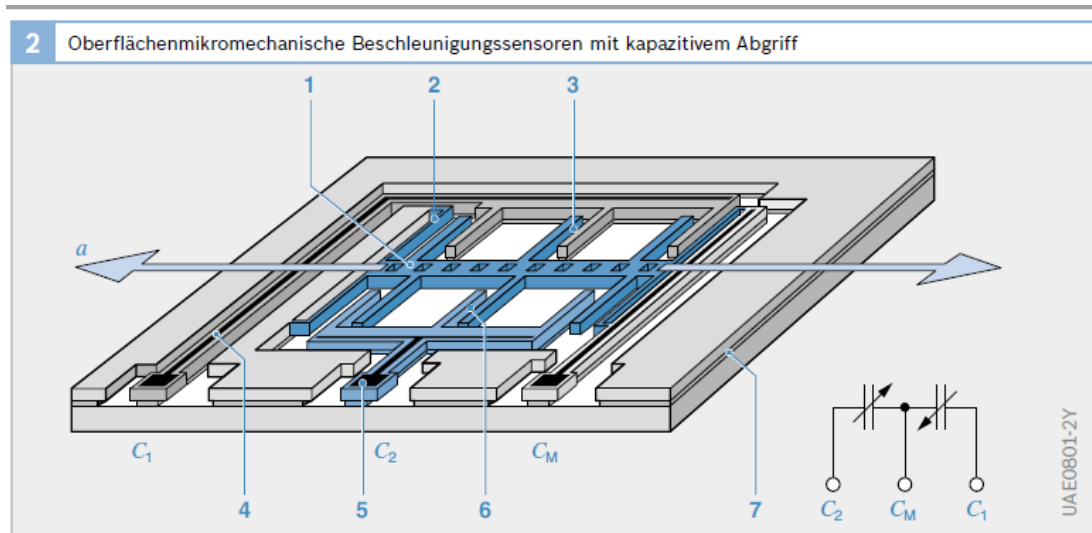


Abbildung 2.4: Aufbau und Bauteile eines MEMS-Beschleunigungssensors [5]

Die federnde seismische Masse mit ihren kammförmigen Elektroden (1) ist dabei mit Hilfe der Feder (2) mit dem starren Gehäuse des Sensors (7) verbunden. Durch zwei feste Elektrodenreihen mit den Kapazitäten (3 & 6) entstehen zwei Einzelkapazitäten, welche sich durch eine Auslenkung der seismischen Masse gegensinnig ändern. Dieser Differentialkondensator wird ausgewertet, da ein linearer Zusammenhang zwischen Beschleunigung und Auslenkung besteht. Die Steuerungseinheit (ASIC) des Sensors erzeugt daraus dann das entsprechende Signal für das nachgeschaltete Steuergerät. Toleranzen und Nullpunkt-Anpassung werden im Fertigungsprozess berücksichtigt und im Speicher der Steuerungseinheit hinterlegt. Für den Selbsttest wird mit Hilfe einer elektrostatischen Kraft die seismische Masse ausgelenkt und eine Beschleunigung simuliert. Anschließend wird in einem Soll-Ist-Vergleich das Sensorsignal auf Plausibilität und Schwellwerterfüllung geprüft.

Durch Clusterung können mehrere Beschleunigungssensoren in einem Bauteil zusammengefasst und integriert werden. Dabei werden beispielsweise für das ESP bis zu drei Beschleunigungssensoren (x-, y- und z-Richtung) sowie zwei Drehratensensoren kombiniert. Dadurch kann die Erfassung und Verarbeitung der einzelnen Sensor-Signale mit einer Steuerungseinheit realisiert werden und es wird die Anzahl der Steuergeräte auf dem Datenbus sowie der resultierende Traffic verringert. [5, 8]

2.1.3 Drehgeschwindigkeitssensoren

Zur Erfassung von Drehgeschwindigkeiten werden in der Regel mechanische Kreisel oder optische Sensoren, welche nach dem Sagnac-Effekt arbeiten, verwendet. Diese Sensoren kommen, mit Blick auf die Kostenoptimierung, im Fahrzeug aber nicht zum Einsatz. Stattdessen werden Sensoren verbaut, die sich ähnlich dem mechanischen Kreisel verhalten und statt einer freien Bewegung nur eine Drehbewegung überlagert mit einer

Schwingbewegung ausführen können. Sie werden deshalb auch als Schwingungsgyrometer bezeichnet. Diese Sensoren messen ausschließlich um die Achse, in der sie ausgerichtet sind. Für eine ESP-Steuerung reichte deshalb ursprünglich ein Sensor aus, welcher die Drehgeschwindigkeit (Gierrate) um die Fahrzeughochachse erfasste. Neuere Systeme und Sicherheitsfunktionen wie der Überrollschutz (Active Rollover Protection) benötigen zusätzliche Sensoren für die Erfassung der Drehgeschwindigkeiten um die x- und y- Achse. Die Funktionsweise und der Aufbau, welcher in Abbildung 2.5 zu sehen ist, ähneln dem eines OMM-Beschleunigungssensors. Durch eine elektrostatische Schwingungsanregung bewegt sich ein Drehschwinger als Plattenelektrode zwischen Kammstrukturen mit Elektroden und bewirkt dadurch eine Kapazitätsänderung. Die in der Struktur wirkenden Coriolis-Kräfte bewirken zusätzlich eine Kippbewegung. Die Auswertung der Amplitude dieser Kippbewegung erfolgt mittels Elektroden in der Bodenplatte unterhalb des Drehschwingers. Die Kapazitätsänderung aufgrund der Kippbewegung verhält sich proportional zur Drehgeschwindigkeit. Um die Dämpfung möglichst gering zu halten, arbeitet der Sensor unter Vakuum-Bedingungen. Dieses Messprinzip ist für den bisherigen Einsatz im Fahrzeug hinreichend genau und kostengünstig.

Wie bei den Beschleunigungssensoren kann man auch die Drehgeschwindigkeitssensoren in einer Sensoreinheit clustern und die Beschleunigungs- und Drehraten-Sensoren in einer Steuereinheit zusammenfassen. [5, S. 148–150]

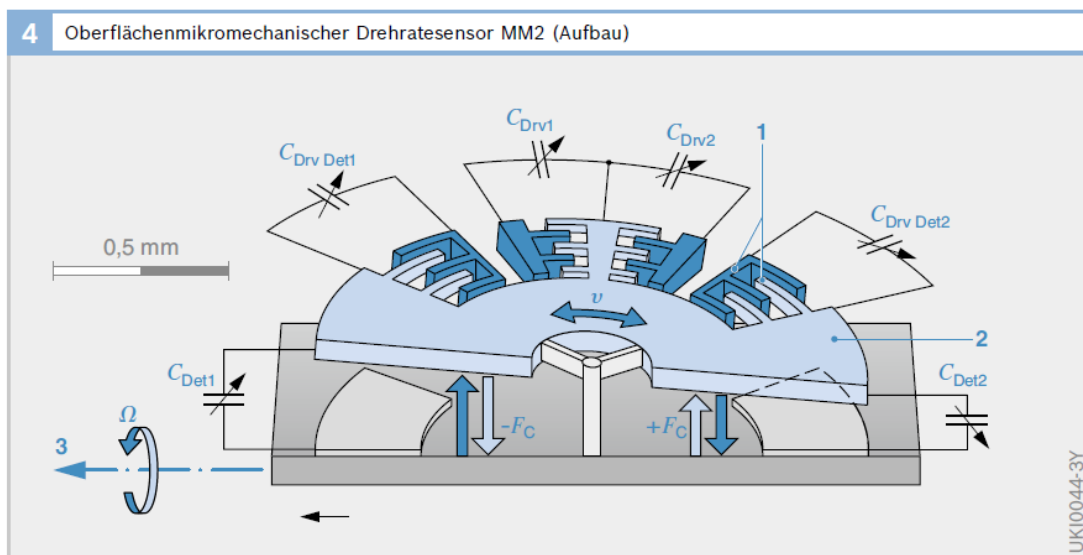


Abbildung 2.5: Aufbau eines Schwingungsgyrometers [5]

2.1.4 Controller Area Network-Bus

Der zunehmende Grad der Automatisierung sowie die steigende Anzahl an Komfortfunktionen führten bisher zu einer stetig wachsenden Anzahl an Steuergeräten. Dies implizierte die Notwendigkeit große Datenmengen in kürzester Zeit zwischen ihnen auszutauschen zu können. Durch Entwicklung und

Integration eines Bussystems stehen die Informationen mehreren Steuergeräten an einem gemeinsamen Bus zur Weiterverarbeitung zur Verfügung. Dabei kann man auf verschiedene Übertragungsmethoden zurückgreifen. In der Automobilindustrie etablierte sich der Controller Area Network (CAN)-Bus. Er hat trotz seiner beschränkten Geschwindigkeit den Vorteil der kollisionsfreien Nachrichtenübermittlung. Dadurch können Verzögerungen durch das erneute Anfordern einer beschädigten oder nicht erhaltenen Nachricht oder die Zeitverzögerung einer Nachricht bei erkannter Kollision, wie beim Ethernet, umgangen werden. Die rasche Entwicklung der Computer- und Fahrzeugtechnik brachte es mit sich, dass aus dem anfänglichen CAN-Bus ein Netzwerk mit verschiedenen CAN-Bus-Systemen wurde. Jedes System weist dabei individuelle Eigenschaften auf. Während beim Motor-/Antriebs- oder Getriebe-Datenbus auf hohe Übertragungsgeschwindigkeiten gesetzt wird, reichen beim Komfort-CAN deutlich langsamere Übertragungsgeschwindigkeiten aus, um die relevanten Informationen und Benutzereingaben jedem anderen Steuergerät zur Verfügung zu stellen. Für die Übertragung von einem Bussystem zu einem anderen wurde dazu ein Gateway-Steuergerät integriert. Dieses empfängt alle Signale und kann sie bei Bedarf, durch Veränderung der Bussgeschwindigkeit, auf ein anderes Subnetzwerk senden.

Man unterscheidet bei der Absicherung der Übertragung zwischen Kollisionsvermeidung, angewendet beim CAN-Bus, und Kollisionserkennung, wie beim Ethernet. Bei der Kollisionsvermeidung kommt es zur Prüfung des Headers der Nachricht und einem Prioritätsvergleich. Das Steuergerät mit der Nachricht der höheren Priorität sendet weiterhin, während das zweite Steuergerät mit der Nachricht niedrigerer Priorität das Senden augenblicklich nach dem Header einstellt und nach einer festgelegten Wartezeit erneut versucht, seine Nachricht auf dem Bus zu senden. Im Gegensatz dazu kommt es bei der Kollisionserkennung zu einem Versatz beider Nachrichten bei erkannter Kollision, denn jedes Steuergerät hält eine individuelle Wartezeit ein, bevor es seine Nachricht erneut sendet. Eine Übersicht dieser Funktionsweisen ist in folgender Abbildung 2.6 dargestellt. [9, S. 110–126]

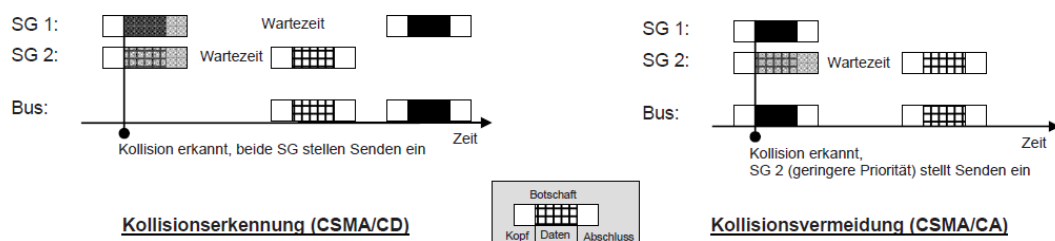


Abbildung 2.6: Unterschied Kollisionserkennung und -vermeidung [9]

Die Ausgabe des Signals in einer spannungsgesteuerten Binärnachricht erfolgt über den CAN-Transceiver. Er empfängt außerdem die von anderen Steuergeräten auf den Bus gesendeten Nachrichten.

2 Theoretische Grundlagen

Dabei kann die Übertragung mit zwei verschiedenen Geschwindigkeiten umgesetzt werden. Diese unterscheiden sich im Aufbau und den Signalpegeln voneinander. Der Unterschied zwischen Low-Speed- und High-Speed-CAN-Bussystemen ist in folgender Abbildung 2.7 dargestellt.

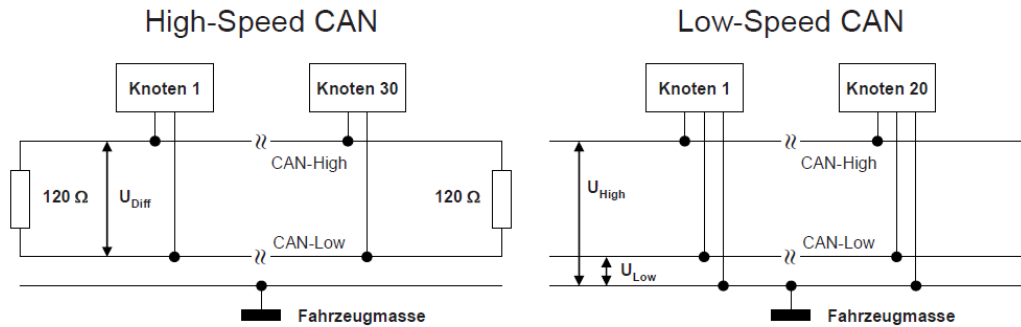


Abbildung 2.7: Unterschied High-Speed- und Low-Speed-CAN [9]

Wie bereits erwähnt, kommt in der Antriebssteuerung und in allen Sicherheitsrelevanten Systemen der High-Speed-CAN-Bus zum Einsatz, weshalb im Nachfolgenden vorrangig auf diesen eingegangen wird.

Beim High-Speed-CAN werden die Signale untereinander verglichen und der Spannungsdifferenzpegel geprüft. Durch Auswertung der Differenzspannung werden die Rechtecksignale auf dem Bus in Binärnachrichten umgewandelt. Dabei wird ein Spannungsdifferenzpegel von 0 V als logische 1 sowie ein Spannungsdifferenzpegel von 2 V als logische 0 interpretiert. Als Referenz dienen in jedem Fall die Fahrzeugmasse, welche außerdem als Abschirmung am Steuergerät vorhanden ist. Eine Verdrillung der Leitungen verhindert den Einfluss elektromagnetischer Störungen auf die Signalpegel. Durch die zwei Abschlusswiderstände mit je 120 Ohm kommt es zur Auslöschung der Signalpegel und der Verhinderung einer Signalreflexion auf dem Bus. Kommt es zu einer Unterbrechung der Signalleitung fällt die Kommunikation komplett aus.

Der Aufbau einer Busnachricht mit 11 Bit Identifier (ID) ist in der folgenden Abbildung 2.8 dargestellt.

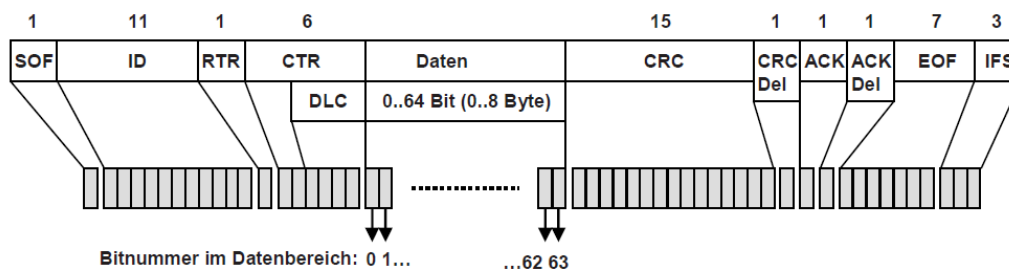


Abbildung 2.8: Aufbau einer CAN-Botschaft [9]

Nach dem Start of Frame (SoF) als „Wecksignal“ der Steuergeräte des Bus-Systems folgt der Identifier (ID). Dieser umfasst 11 oder 29 Bit und definiert die Priorität der gesendeten CAN-Nachricht. Bei gleichzeitigem Sendeversuch darf das Steuergerät mit dem längeren dominanten Spannungspegel,

spricht der niedrigeren Dezimalzahl, weitersenden, während das andere gleichzeitig sendende Steuergerät das Senden einstellt. Dies wird als Arbitrierung bezeichnet.

Für die Auswertung der Daten aus den Versuchen mit dem Biofidel-Dummy und dem VW Tiguan ist außerdem der Data Length Code (DLC) von Relevanz. Er gibt an, wie viele Daten in dem anschließenden Datenfeld enthalten sind. Dabei variiert die Datenlänge im Bereich von 0 bis 64 Bit oder umgerechnet 8 Byte. Das hat zur Folge, dass Busnachrichten unterschiedlich lang sein können. Alle anschließenden Signalpegel waren für die Daten aus den Crash-Versuchen nicht relevant, weshalb in diesem Kapitel nicht weiter darauf eingegangen wird.

Analysiert man die Spannungspegel eines Bus-Systems mit Hilfe eines Oszilloskops, benötigt man ebenfalls Kenntnis über die Übertragungszeit eines Bits. Diese kann man mit folgender Formel berechnen.

$$t_{Bit} = \frac{1 \text{ Bit}}{R_T} \quad (2.2)$$

Bei einer Übertragungsgeschwindigkeit R_T von 1000 kBit/s ergibt sich daraus eine Zeit je Bit von 1 μ s. Bei der Übertragung von 8 Byte (64 Bit) hat eine Nachricht dann eine Gesamtlänge von rund 136 μ s. Halbiert man die Übertragungsgeschwindigkeit, verdoppelt sich die Gesamtlänge der Nachricht. Der Zusammenhang ist dementsprechend indirekt proportional. Zwischen zwei Nachrichten wird eine festgelegte Zeit von mindestens 3 Bit im Inter-Frame-Space (IFS) als Pause am Ende der Nachricht vom zuletzt sendenden Steuergerät erzwungen. Danach befindet sich der Bus im Leerlauf, bis ein Steuergerät einen neuen Sendevorgang mit dem Start of Frame Bit beginnt.

Die Steuergeräte sind dabei nicht untereinander synchronisiert und besitzen jedes ihren eigenen internen Zeitgeber. Der CAN-Transceiver misst außerdem nicht kontinuierlich das Signal, sondern tastet dieses nur mit einer Abtastrate grob ab. Um eine Fehlinterpretation des Signals zu vermeiden, muss die Abtastung innerhalb des Intervalls der Bitzeit relativ spät stattfinden. Diese Kriterien begrenzen den Abstand zwischen zwei Steuergeräten, denn es muss ausreichend Zeit sowohl für eine Hin- und Rückbewegung des Spannungspegels auf dem Bus als auch für die Signalauswertung in jedem Steuergerät vorhanden sein.

Wichtige Signale wie die Fahrzeuggeschwindigkeit oder Daten der Motorsteuerung werden, in vom Hersteller in der Steuergeräte-Applikation festgelegten Intervallen, verschickt. Diese wiederkehrenden Signale liegen allen Steuergeräten in definierten Abständen vor, beispielsweise alle 20 ms. Aus der Länge einer Nachricht sowie dem Intervall lässt sich anschließend der Einfluss dieser Nachricht auf die Buslast mit der folgenden Gleichung berechnen.

$$L_{Bus} = \frac{t_{Message}}{t_{Interval}} * 100\% \quad (2.3)$$

Bei einer Nachricht der maximalen Länge (8 Byte) von 136 μ s (0.136 ms), welche im Sendeintervall von 20 ms gesendet werden soll, ergibt sich ein Einfluss auf die Buslast von 0,68%. Da eine Busauslastung von 100% die Möglichkeit von nicht gesendeten Nachrichten niederer Priorität bedeuten könnte, werden Bus-Systeme heute meist für eine maximale Buslast von 50% ausgelegt. In diesem Fallbeispiel wären das maximal rund 73 mögliche Signale auf diesem Datenbus. [9, S. 118–126]

2.2 Charakterisierung von Fußgängerunfällen

Zusammenstößen mit Fußgängern zählen neben denen mit Motorrädern zu den gefährlichsten Unfällen im Straßenverkehr, da es im Verhältnis zu allen anderen Straßenverkehrsteilnehmern mehr Getötete als Verletzte gibt. Aus diesem Grund wurde im Laufe der Entwicklung von Fahrzeugen und Assistenzsystemen ein vermehrter Fokus auf den Schutz der vulnerablen Verkehrsteilnehmer gelegt. Entwicklungen wie der Frontscheiben-Airbag oder die radargestützte Abstandswarnung wurden zum Teil in gesetzliche Forderungen integriert. Der Fußgänger ist aufgrund seiner großen Massendifferenz zu anderen Verkehrsteilnehmern besonders häufig von schweren bis tödlichen Verletzungen betroffen. Vor allem seine stark variierende Geschwindigkeit als auch die Unabhängigkeit seiner Bewegungsrichtung von vorgeschriebenen Verkehrswegen machen ihn zu einem unberechenbaren Kollisionsgegner. In den nachfolgenden Kapiteln werden die Kollisionsarten sowie Verletzungsscharakteristiken dargestellt. Es wird zudem zusätzlich auf aktuell vorhandene Sicherheitssysteme in Bezug auf Fußgängerunfälle verwiesen [10, S. 14].

2.2.1 Kollisionsarten und -abläufe

In der Unfallrekonstruktion werden die verschiedenen Kollisionsarten und Bewegungsrichtungen jeglicher Kontaktpartner (PKW/NKW, Radfahrer, Fußgänger etc.) betrachtet und untersucht. Für diese Diplomarbeit werden vorrangig Fußgängerunfälle mit anderen Verkehrsteilnehmern betrachtet. Der Zusammenstoß kann dabei vielseitig ausfallen, da der Fußgänger sowohl in seiner Bahn als auch Geschwindigkeit von Straßen und Wegen unabhängig ist. In der nachfolgenden Tabelle 2.1 sind alle Merkmale von Fußgängerunfällen zusammengefasst. Dabei unterscheidet man die Bewegungsart und -richtung sowie die Kontakt- bzw. Kollisionsart des Fußgängers und des Kontaktpartners.

2 Theoretische Grundlagen

Tabelle 2.1: Übersicht über die Kollisionsarten und -abläufe eines Fußgängerunfalls [11]

	Fußgänger	Kontaktpartner
<i>Bewegungsart</i>	Stillstand Stationäre Bewegung Beschleunigung Verzögerung	Stillstand Stationäre Bewegung Beschleunigung Verzögerung
<i>Bewegungsrichtung</i>	Zum Hindernis hin Vom Hindernis weg	Stillstand Vorwärtsfahrt Rückwärtsfahrt Schleudern Überschlagen
<i>Kontaktart, Kollisionsart, Ort des Kontaktes</i>	Körper voll getroffen Körper teilweise getroffen Streifkollision Überrollen Überfahren	Frontal Hinten Seitlich Unten Oben

In der Unfallrekonstruktion werden für verschiedene Anstoßarten unterschiedliche Herangehensweisen notwendig. Bei einem vollen Frontalzusammenstoß wird der Fußgänger beispielsweise mit der Geschwindigkeit des Fahrzeugs zum Kollisionszeitpunkt beschleunigt. Bei einem Streifstoß oder teilweisen Frontalzusammenstoß wird zusätzlich zwischen den zwei Überdeckungsarten hineinbewegender und hinausbewegender Fußgänger unterschieden. Der hineinbewegende Fußgänger beschreibt dabei die Überdeckung der Körperteile des Fußgängers mit den Umrissen des Fahrzeugs, wenn er sich in dessen Bahn bewegt. Der hinausbewegende Fußgänger wird meist an dem Bein getroffen, mit welchem er sich noch in der Kontur des Fahrzeugs befindet. Außerdem wird noch zwischen einem gebremsten und ungebremsten Vollstoß unterschieden. Der gebremste Vollstoß wird dabei in die Phasen Kontakt, Transport, Flug und Rutsch eingeteilt. Beim ungebremsten Vollstoß gibt es außerdem mehrere Szenarien wie der Fußgänger sich postkollisionär verhält. Beim ersten wird der Fußgänger aufgeladen und ein Stück vom ungebremsten Fahrzeug transportiert, ähnlich dem gebremsten Stoß. Bei der anschließenden Bremsung trennt er sich vom Fahrzeug und wird in Fahrtrichtung geschleudert. Dabei ist die Gesamtwurfweite größer als beim gebremsten Stoß, da die Transportphase länger ist und die Bremsung erst postkollisionär stattfindet. Beim zweiten Szenario wird der Fußgänger ebenfalls ungebremst aufgeladen und fällt anschließend seitlich vom Fahrzeug herunter. Die resultierende Endlage ist meist vor der Endlage des Fahrzeugs und kann demzufolge als Wurfweite keinen Aufschluss über die Kollisionsgeschwindigkeit geben. Beim dritten Szenario wird der Fußgänger über das Dach geworfen

und die Wurfweite entspricht dabei ungefähr der eines gebremsten Anstoßes. Beim letzten zu unterscheidenden Szenario erfolgt kein Transport des Fußgängers, sondern nur ein reiner Stoß zur Seite. Dies lässt, ähnlich dem abgleitenden zweiten Szenario, keine Aussage auf die Kollisionsgeschwindigkeit zu. Ferner lässt sich noch das seitliche Streifen als Szenario beschreiben, bei dem der Fußgänger rein mit der Fahrzeugseite in Kontakt kommt und sich dabei Verletzungen zuzieht.

In extremeren Umständen kommt es zu einem Überrollen oder Überfahren des Fußgängers. Beim Überrollen kommt es, im Gegensatz zum Überfahren, zum Abrollen eines Rades über den Körper des Fußgängers. Selten wird ein Fußgänger von dem Fahrzeug überrollt, von dem er auch erfasst und umgestoßen wurde.

Entscheidend bei der Rekonstruktion von Fußgängerunfällen ist die Wurfweite. Diese ist der Abstand zwischen der Kollisionsstelle des Fußgängers mit dem anderen Verkehrsteilnehmer und seiner Endlage. Dabei unterscheidet man zwischen Längs- und Querswurfweite sowie der entsprechenden Rutschweite in Längs- und Querrichtung nach Landung des Fußgängers auf dem Untergrund. Dabei wird die Längsrichtung als Fahrrichtung des Fahrzeugs bezogen auf den Schwerpunkt des Fußgängers definiert. Alle diese Abstände sind in folgender Abbildung 2.9 zusammengefasst und dargestellt. [11, S. 391–426]

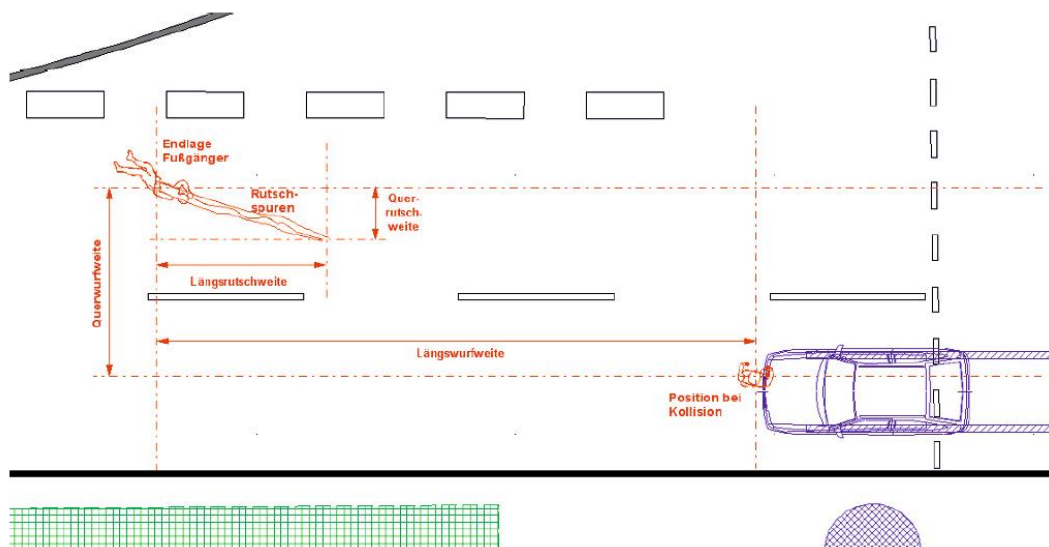


Abbildung 2.9: Übersicht der Abstandsbezeichnungen bei Längswurf des Fußgängers [11]

Bei Fußgängerunfällen kommt es auch zu einer Beeinflussung des Fahrzeugs. Zum einen nimmt in der Transportphase die Masse auf der Vorderachse zu und zum anderen erfährt das Fahrzeug eine negative Beschleunigung aufgrund des Zusammenstoßes mit dem Fußgänger.

Aus der Vielfältigkeit des Ablaufs eines Fußgängerunfalls entstehen die verschiedensten Verletzungscharakteristiken. Aus diesem Grund gibt es gesetzliche Prüfkriterien, die von jedem Fahrzeug erfüllt werden müssen.

2.2.2 Verletzungscharakteristiken und normierte Tests

Fußgänger sind ungeschützt gegenüber anderen Verkehrsteilnehmern und zählen deshalb neben Fahrradfahrern zu der Gruppe vulnerabler Verkehrsteilnehmer. Sie gehen selten unverletzt aus einem Unfall mit einem anderen Verkehrsteilnehmer hervor. Am häufigsten sind Verletzungen der Extremitäten, insbesondere der Beine, sowie Verletzungen des Kopfes und Traumatata. Ersteres entsteht meist im Zuge des Erstkontakts mit dem Unfallgegner. Bei Frontalkollisionen mit Personenkraftwagen kommt der Fußgänger zuerst mit der vorderen Stoßfängerabdeckung und dem dahinterliegenden Stoßfänger in Kontakt. Die Folge ist ein Anstoß im Bereich der Beine oder des Beckens, abhängig von der Größe des Fahrzeuges. Durch den Unterzieheffekt können die Beine aufgrund der Tatsache, dass sie zum Zeitpunkt der Kollision das Gewicht des Fußgängers tragen, unter den Stoßfänger gezogen werden. Dabei besteht die Gefahr des Verhakens an Fahrzeugkanten oder dem Kennzeichen. Das Fußgelenk erfährt eine Rotation, wodurch Verzerrungen, Bänderdehnungen und -risse die Folge sein können. Wird der Fußgänger unterhalb seines Schwerpunktes getroffen, erfährt er infolge des Hebelarmes eine Rotation. Die auf die getroffenen Körperteile wirkende Massenträgheit in Verbindung mit der Elastizität dieser bewirkt eine verspätet einsetzende Drehbewegung. Welches Bein in welcher Stellung von dem Fahrzeug getroffen wird, hat ebenfalls einen Einfluss auf die Drehbewegung. Anschließend kommt es zum Aufschaukeln des Fußgängers auf die Motorhaube und zum Auftreffen des Körpers und/oder Kopfes. Dabei kann der Kopf auf der Motorhaube sowie im Frontscheibenbereich oder im Bereich der äußeren A-Säule aufschlagen. In diesem Moment erfährt der verunfallte Fußgänger eine zweite Beschleunigung. Hier entstehen Verletzungen aufgrund des Anpralls des ungeschützten Körpers oder Kopfes mit Karosserieteilen des Fahrzeugs sowie der auf die verschiedenen Körperteile wirkenden Beschleunigungen. Bewegt sich das Fahrzeug nach dem Kontakt ungebremst weiter, kann es zu einem Überwurf des Fußgängers über das Fahrzeug kommen. Dabei kommt es in der Regel zu weiteren Kontakten mit dem Fahrzeug und entsprechenden Folgeverletzungen. Bremsst das Fahrzeug vor oder unmittelbar nach der Kollision, wird der Fußgänger in Fahrtrichtung beschleunigt und trennt sich in der Flugphase von der Motorhaube. Anschließend erleidet der Fußgänger weitere Verletzungen beim Auftreffen auf die Fahrbahn sowie auf eventuelle Bodenunebenheiten. Zusätzliche Frakturen, Traumatata und ähnliches können in dieser Phase entstehen. Besitzt der Körper danach noch kinetische Energie, schließt sich eine Rutschphase an, in der Abschürfungen und Schnittverletzungen entstehen können, bis dieser seine Endlage erreicht. [11, S. 396–401]

Aufgrund der meist schweren bis tödlichen Verletzungen gelten gesetzliche Vorschriften, die jedes Fahrzeug für eine Typgenehmigung innerhalb der

2 Theoretische Grundlagen

Europäischen Union erfüllen muss. In der UN/ECE-Regelung 127 sind speziell genormte Tests für den Frontalzusammenstoß mit einem Fußgänger vorgeschrieben. Die nachfolgende Abbildung 2.10 fasst alle zulassungsrelevanten Prüfverfahren zusammen [12].

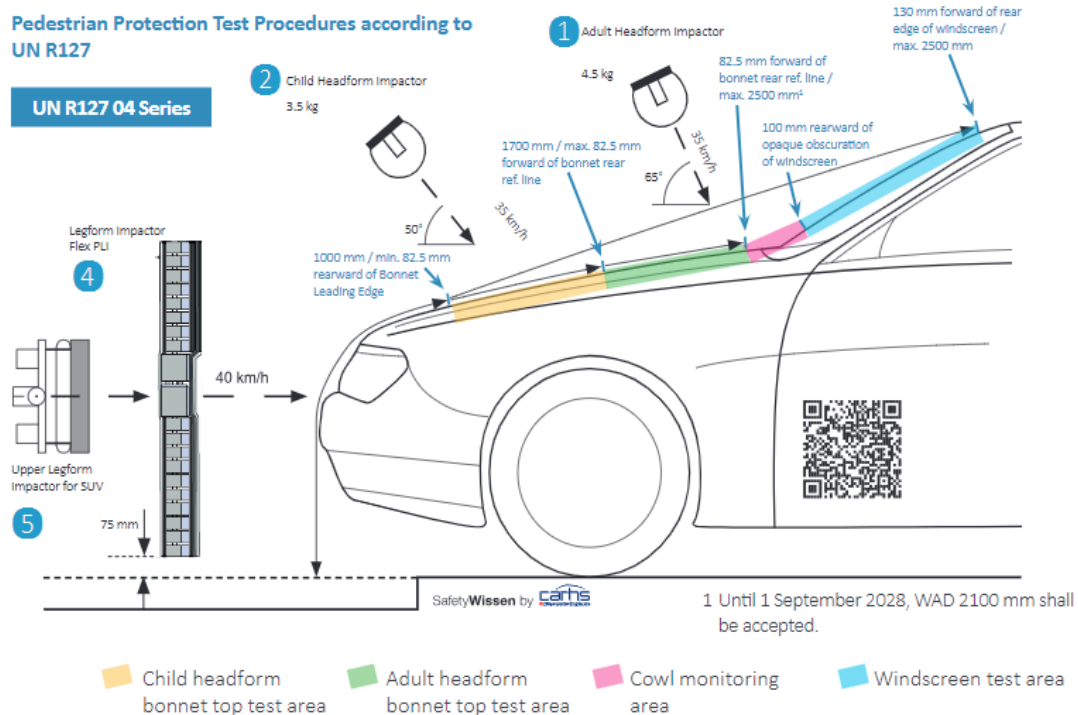


Abbildung 2.10: Übersicht über die gesetzlichen Anforderungen nach UN/ECE-R.-127 [13]

Für den Erstkontakt oder den Anstoß an das Bein kommt bei Fahrzeugen mit einer unteren Stoßfängerhöhe bis 425 mm ein flexibler Beinprüfkörper zum Einsatz. Dieser wird mit Fußhöhen-Abstand zur Fahrbahn mit einer Geschwindigkeit von 40 km/h gegen das Fahrzeug geschlagen. Dabei dürfen die dynamischen Dehnungen des Kollateralbandes und der Kreuzbänder die Grenzwerte nicht überschreiten. Zudem darf das Schienbein keinem Biegemoment größer 340 Nm ausgesetzt sein. Bei Fahrzeugen mit einer unteren Stoßfängerhöhe von mehr als 500 mm wird stattdessen ein Hüftprüfkörper verwendet. Im Bereich zwischen 425 und 500 mm können beide Prüfverfahren eingesetzt werden. Beim Hüftprüfkörper erfolgt die Annahme, dass der Fußgänger zuerst an der Hüfte vom Fahrzeug getroffen wird. Dies ist vor allem bei Transportern und Sport Utility Vehikeln (SUVs) der Fall. Dabei darf die Summe aller Aufprallkräfte in einem Punkt niemals höher als 7,5 kN und das auf den Prüfkörper wirkende Biegemoment darf höchstens 510 Nm betragen.

Das Auftreffen des Kopfes wird mit zwei unterschiedlichen Prüfkörpern für einen Erwachsenen und ein Kind realisiert. Dabei wird vom Fahrzeughersteller die Motorhaube, senkrecht betrachtet, in Flächen aufgeteilt. Das Head Injury Criterion (HIC) darf über 2/3 der Prüffläche nicht mehr als 1000 und der restlichen Fläche nicht mehr als 1700 betragen. Zur Überprüfung werden je

Prüfkörper mindestens 9 Prüfschläge durchgeführt und gerade die kritischen Punkte im Übergang der Bereiche zwischen HIC 1000 und HIC 1700 geprüft. Das HIC wird dafür über folgende Formel berechnet.

$$HIC = \left[\frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} a \, dt \right]^{2,5} (t_2 - t_1) \quad (2.4)$$

„a“ ist dabei die gemessene Beschleunigung in Schwerkrafteinheiten und die Zeitpunkte t_1 und t_2 sind dabei die Messzeitpunkte während des Aufpralls, welche niemals länger als 15 ms auseinander liegen dürfen. Die Geschwindigkeit des Prüfkörpers ist dabei mit $9,7 \text{ m/s} \pm 0.2 \text{ m/s}$ definiert. Dies entspricht rund 35 km/h. [12, 13]

Diese Tests umfassen die gesetzlich vorgeschriebenen Prüfscenarien, die ein Fahrzeug für die Homologation innerhalb der Europäischen Union erfüllen muss. Unabhängige Organisationen wie beispielsweise die Euro NCAP setzen verschärfte Prüfscenarien in Crash-Versuchen ein, um ein Ranking verschiedener Fahrzeugmodelle sowie eine Vergleichbarkeit untereinander herstellen zu können. Diese Tests sind aber nicht gesetzlich verpflichtend und dienen einzig der Verbraucherinformation.

Fahrzeughersteller mit einem besonders ausgeprägtem Sicherheitsbewusstsein, wie beispielsweise Volvo, setzen schon während der Gesamtfahrzeugentwicklung einen besonderen Schwerpunkt auf die überdurchschnittliche Erfüllung aller Tests und Vorgaben. Gerade auch bei diesen Herstellern sind Innovationen in Sachen Fußgängersicherheit wie der Fußgänger-Airbag oder die Anhebung der Motorhaube durch eine Treibsatzladung ähnlich einer Airbag-Zündung, schon seit Beginn der 2010er Jahre verbaut. Auf diese Systeme wird im folgenden Kapitel eingegangen.

2.2.3 Sicherheitssysteme zur Vermeidung von Fußgängerunfällen

Wie vorher bereits genannt halten Innovationen zuerst in der Oberklasse Einzug. Viele dieser werden aufgrund der steigenden Produktion im Laufe der Zeit kostengünstiger und dann in anderen Fahrzeugklassen etabliert, bis sie schlussendlich gesetzlich für alle Fahrzeuge gefordert werden. Beispielsweise wären hierfür in der Vergangenheit die Ausrüstung mit ABS/ESP oder den Verbau von Sicherheitsrückhaltesystemen zu nennen [14, 15].

In Bezug auf die Reduzierung der Schadensschwere oder Vermeidung von Fußgängerunfällen wurde über mehrere Jahre hinweg vorrangig in Richtung der Karosserieentwicklung geforscht und weiterentwickelt. Damit entfielen die, Anfang der 1970er Jahre und im Zuge der FMVSS 215 entwickelten, hervorstehenden Stoßfänger. Es wurden Stoßfängerabdeckungen aus verformbaren Materialien entwickelt und an allen Fahrzeugen ab spätestens Mitte der 1990er Jahre verbaut. Charakteristische Kanten sowie Ecken und hervorstehende Konturen der Front, wurden mit zunehmender Verrundung designt,

um das Verletzungsrisiko von Fußgängern im Falle eines Unfalls weiter zu reduzieren. Neben diesen konstruktionsbedingten Maßnahmen trägt auch die Entwicklung der Fahrzeugumfeldsensorik mit dem Einsatz von Radar- und Lidarsensoren sowie Kamerasystemen zur Steigerung der Verkehrssicherheit und dem Schutz von vulnerablen Verkehrsteilnehmern bei. Durch diese Sensoren kann das Fahrzeug ein Objekt erkennen, durch eine Kamera beispielsweise klassifizieren und, im Falle einer prädiktiven Abschätzung der Gefahrensituation, den Fahrer warnen. Kommt es zu keiner Reaktion des Fahrers, ist es nach Auslegung des Assistenzsystems möglich, dass dieses eine Vollbremsung bis an die ABS-Regelgrenze einleitet. Der Fahrzeugführer kann das System jederzeit durch eigene Handlung und Eingabe überstimmen [16–19].

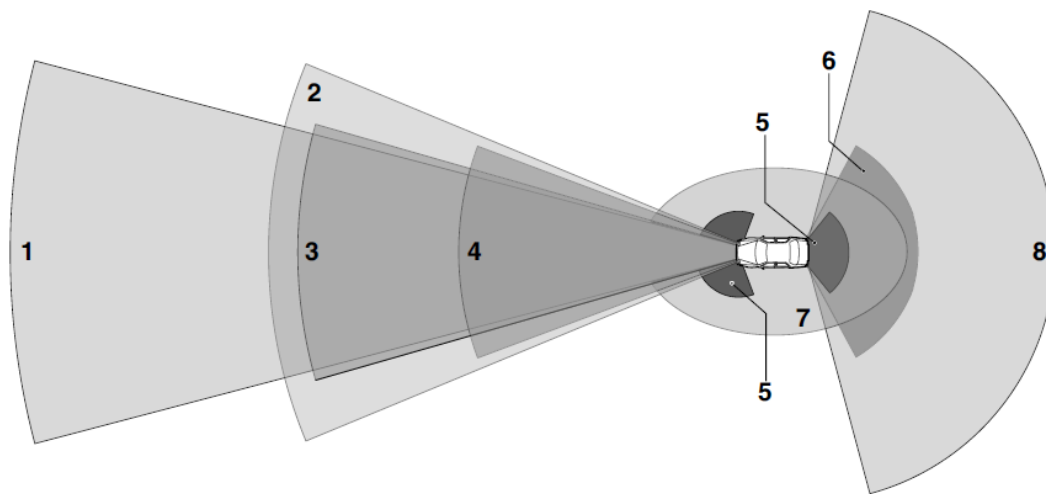


Abbildung 2.11: Umfeldsensorik und Detektionsbereiche [20]

Für die Umfeldsensorik wird der Bereich vor und hinter dem Fahrzeug in Abschnitte aufgeteilt, diese sind in der Abbildung 2.11 dargestellt. Der Fernbereich (1) beschreibt dabei den Abschnitt mit dem größten Abstand zum Fahrzeug. Dieser wird in der Regel durch Long-Range-Radarsensoren oder Lidarsensoren mit hoher Reichweite abgedeckt und umfasst einen Bereich von bis zu 300 m vor dem Fahrzeug. An ihn schließt sich der Mittelbereich (2) an. Dieser ist für die Fahrerassistenzsysteme von zentraler Bedeutung, da er den Abschnitt bis 160 m vor dem Fahrzeug umfasst. Die Abdeckung erfolgt mit Mittelbereichsradar-Sensoren sowie mit Hilfe von Mono- oder Stereo-Kamerasystemen. Da Fußgängerunfälle vorrangig im urbanen Raum geschehen, ist die Sensorik und Auswertung dieses Bereichs vor dem Fahrzeug von zentraler Bedeutung. Der anschließende Nahbereich (7) - bis 20 m um das Fahrzeug - wird in der Regel von Ultraschallsensoren und Multi-Beam-Lidarsensoren abgedeckt. Bei Erfassung von Objekten in diesem Bereich wird je nach Implementierung im Fahrzeug automatisch eine Notbremsfunktion ausgelöst, um eine Kollision zu vermeiden. Der Ultranahebereich (5) bis 5 m ist vorrangig für die Komfort-basierten Assistenzsysteme von Bedeutung und deshalb wird darauf im nachfolgenden nicht weiter eingegangen. [20, S. 1808–1810]

In jedem dieser Bereiche können Radar-Sensoren zum Einsatz kommen. Radar (Radio Detection and Ranging) war durch seine militärische Entwicklung im Zweiten Weltkrieg lange eine Technik, die ausschließlich dem Militär vorbehalten war. Nach einem Projekt des Bundesforschungsministeriums in den 1970er Jahren, welches sich mit der serientauglichen Entwicklung von Radar-Sensoren für die Reduzierung von Auffahrunfällen beschäftigte, dauerte es aber noch bis 1998, bis die ersten Fahrzeuge mit Radartechnik in Serie starteten. In der S-Klasse von Mercedes wurde ein Radarsensor für den damals neu entwickelten Abstandsregeltempomaten eingesetzt, um die Distanz sowie die Geschwindigkeit des vorrausfahrenden Fahrzeugs zu bestimmen und einen vom Fahrer eingestellten Abstand zu ihm halten zu können. Die Auffahrwarnfunktion war nur zweitrangig integriert. Im Jahr 2003 wurde die Entwicklung der Radartechnik in Fahrzeugen durch die Entwicklung der automatischen Notbremsfunktion sowie der Fahrstreifenwechselassistenten erneut fokussiert.

Radar-Systeme nutzen elektromagnetische Wellen, welche sich mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten und berechnen die Zeitdifferenz zwischen zwei Echoloten. Durch die hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit lassen sich auch größere Entfernungen schnell messen und es besteht kein Einfluss der Umgebungstemperatur. Ein Oszillator erzeugt elektromagnetische Wellen mit genau definierter Frequenz, welche über eine Sendeantenne abgestrahlt werden. Diese breiten sich dann in der umgebenen Luft mit Lichtgeschwindigkeit aus und werden von Objekten innerhalb des Strahlungsbereiches reflektiert. Die Reflexion trifft dann auf die Empfangsantenne und wird von dieser erfasst. Anschließend werden Sende- und Empfangssignal miteinander überlagert, um die Dopplerfrequenz auswerten zu können. Zum Doppler-Effekt kommt es, wenn eine elektromagnetische Welle von einem Objekt reflektiert wird, welches sich relativ zum Sender bewegt. Dadurch kommt es zu einer Frequenzverschiebung, welche proportional zur Relativgeschwindigkeit und zum Kehrwert der Wellenlänge ist. Das heißt, wenn sich Sender und Objekt aufeinander zubewegen, erhöht sich die vom Beobachter (Empfänger) gemessene Frequenz. Entfernen sich die Sender- und Empfangseinheit und das Objekt voneinander, verringert sich die erfasste Frequenz. Die Dopplerfrequenz ist dementsprechend die Differenz aus empfangener und gesendeter Frequenz. Das überlagerte Signal wird anschließend verstärkt und digitalisiert und zur Auswertung mittels Fast Fourier Transformation (FFT) an einen Hochfrequenz-Mikrocontroller übertragen. Dieser ist ebenfalls für die Ansteuerung der Frequenzerzeugung verantwortlich und kommuniziert mit einem zweiten Mikrocontroller, welcher die interne Diagnose des Moduls steuert und über einen Bustransceiver mit dem Datenbus des Fahrzeugs kommuniziert [20, S. 1816–1822].

Lidar (Light Detection and Ranging) arbeitet, wie auch der Radar-Sensor, mit elektromagnetischen Wellen zur Identifizierung und Abstandsmessung von Objekten. Das Frequenzspektrum reicht dabei jedoch von infrarotem oder ultraviolett bis hin zu sichtbarem Licht. Meistens arbeiten die im Fahrzeug verbauten Sensoren aber im Infraroten Bereich und nutzen die sogenannte „Time-of-Flight“ (kurz ToF) Messung. Bei der ToF Messung werden ein oder mehrere Lichtimpulse ausgesendet und es wird die Zeitdauer erfasst, bis die Reflexionen wieder empfangen werden. Durch die feste Wellenlänge des infraroten Lichts und die Ausbreitung mit Lichtgeschwindigkeit kann aus der Zeitdifferenz die Distanz des Objektes bestimmt werden. Probleme dieses Systems bestehen unter Umständen bei Nebel oder Nieselregen, da die Tröpfchen in der Luft die Lichtimpulse reflektieren und zu Fehldetektionen führen können. Aus diesem Grund haben heutige Sensoren eine dynamische Anpassung der Empfindlichkeit. Des Weiteren wird der Dopplereffekt bei diesem Sensor nicht verwendet, da es die interne Auswerteelektronik nur preisintensiver gestalten würde. Zur Messung der Relativgeschwindigkeit wird deshalb auf zwei aufeinanderfolgende Messungen zurückgegriffen und der Phasenversatz zwischen ihnen interpretiert. Die resultierende Relativgeschwindigkeit ist aufgrund der Messgenauigkeit und der anschließenden Filtrierung erneut phasenversetzt, was für die Nutzung des Sensors für Assistenzsysteme berücksichtigt werden muss [20, S. 1824–1836].

Aktuelle Anforderungen an automatische Notbremssysteme werden ebenfalls in der UN/ECE-Regelung 152 zusammengefasst. Darin werden unter anderem auch Prüfscenarien beschrieben, die zum Erlangen einer Typgenehmigung erreicht werden müssen. Diese beziehen sich aber vorrangig auf querende Fußgänger mit Geh-Geschwindigkeiten von 5 km/h. Hierbei werden die verschiedenen Bewegungsrichtungen oder Geschwindigkeiten von Fußgängern aber nicht näher betrachtet. Das System soll nur bei trockener Fahrbahn, unabhängig von der Beladung des Fahrzeugs die relative Kollisionsgeschwindigkeit entsprechend einer Tabelle erreichen [19, 21].

Perspektivisch wird die Sensordatenfusion in Zukunft weiter ausgeweitet. Dabei werden mehrere Sensoren mit unterschiedlichen Messprinzipien, wie beispielsweise Radar-Sensor in Kombination mit einem Kamera-System oder Lidar-Sensor, kombiniert. Durch Auswertung der jeweiligen Messdaten können Objekte im Fahrzeugumfeld sicherer detektiert und klassifiziert werden. Zeitgleich steigt die Anzahl an gesetzlich geforderten Assistenzsystemen und nach dem Notfallbremsassistent ist jetzt auch der Ereignisdatenspeicher für alle neu zugelassenen Fahrzeuge gefordert. Dieser unterstützt den Fahrer zwar nicht präventiv bei der Unfallvermeidung oder -verhinderung, zeichnet dafür aber alle relevanten Fahrzeugparameter für eine anschließende

Unfallrekonstruktion auf. Inwieweit diese verwendbar sind und welche Daten dauerhaft gespeichert werden, wird im anschließenden Kapitel betrachtet [20].

2.3 Ereignisdatenspeicher nach UN/ECE-Regelung 160

Durch Verabschiedung der UN/ECE-Regelung Nr. 160 am 30. September 2021 wurde die Zulassungsvorschrift für Fahrzeuge der Klassen M1 und N1 erweitert. Sie schreibt für alle neuen Fahrzeugmodelle ab 2022 sowie für alle neuzugelassenen Fahrzeuge ab 07. Juli 2024 einen Ereignisdatenspeicher (engl. Event Data Recorder – kurz EDR) vor. Dabei wird sich an der Vorlage, der seit 2006 in den USA geltenden Regelung der NHTSA 49 CFR-Part 563 orientiert. Der Ereignisdatenspeicher ähnelt dem Flugdatenschreiber, welcher seit 1968 bei kommerziellen Flugzeugen vorhanden sein muss, und ist in der Regel im Airbag-Steuergerät verbaut. Er zeichnet kontinuierlich eine definierte Anzahl an Fahrzeugparametern auf und hinterlegt diese im flüchtigen Speicher. Dieser wird kontinuierlich überschrieben, bis ein Ereignis eintritt und die Sicherung der Daten gestartet wird. Die Daten werden anschließend in einen festen Speicher übertragen. Mindestens zwei Datensätze müssen in diesem hinterlegt werden können. Aus dem festen Speicher können sie dann mit Hilfe eines Auslesegeräts abgerufen werden. Alle Parameter und die Definition der Schwellwerte sind in der UN/ECE-Regelung 160 zusammengefasst. Der Zugang zu den Daten des EDR wird vom Hersteller beschrieben und kann nationaler Gesetzgebung unterliegen, weshalb in der UN/ECE-Regelung nicht weiter darauf eingegangen wird [22–27].

2.3.1 Verpflichtende und optionale Parameter

Der Datensatz eines Ereignisdatenspeichers entsprechend UN/ECE-Regelung 160 umfasst eine obligatorische Liste an Parametern, welche in einem definierten Intervall mit einer festgelegten Abtastrate im Speicher des Steuergeräts hinterlegt werden müssen. Dazu zählen unter anderem beispielsweise die für den Schwellwert der manuellen Auslösung relevanten Werte für die Geschwindigkeitsänderung (Δv) in Längs- und Querrichtung. Diese müssen mit einer Abtastrate von mindestens 100 Hz sowie in einem Zeitraum von 0 (Zeitpunkt des Ereignisses) bis maximal 250 ms danach aufgezeichnet werden. Die verpflichtete Aufzeichnung für die jeweilige Geschwindigkeitsänderung entfällt, wenn die Beschleunigung in Längs- oder Querrichtung mit mindestens 500 Hz über einen ausreichend großen Zeitraum aufgezeichnet wurde. Aus diesen Daten kann Δv mit hinreichender Genauigkeit durch Integration berechnet werden. Dabei gilt, dass Beschleunigungswerte während der Aufzeichnungsphase oder spätestens während des Abrufens mit dem Diagnosetool gefiltert werden müssen. Des Weiteren ist eine Deaktivierung des Systems gesetzlich ausgeschlossen.

Die vollständige Liste an aufzuzeichnenden Parametern befindet sich in Anlage 1 bis Anlage 6. [22, 23]

Vor allem die Schwellwerte für das Setzen des Zeitpunktes Null (t_0) des Ereignisses und die Auslösung einer Datenspeicherung sind dabei von Bedeutung.

2.3.2 Auslösen der Datenspeicherung

Die Datenspeicherung aus dem flüchtigen in den festen Speicher erfolgt aufgrund von Ereignissen. Die Folgenden müssen, entsprechend der UN/ECE-Regelung 160, eine feste Speicherung im EDR auslösen:

- Änderung der Geschwindigkeit in Längs- oder Querrichtung um mehr als 8 km/h innerhalb eines Zeitintervalls von 150 ms oder weniger
- Auslösen eines irreversiblen Insassen-Rückhaltesystems (Airbag, Gurtstraffer etc.)
- Aktivierung eines Sicherheitssystems für vulnerable Verkehrsteilnehmer (Motorhaubenanhebung, Fußgänger-Airbag etc.)

Die im nicht-flüchtigen Speicher hinterlegten Datensätze können bei Erreichen der Speichergrenze überschrieben werden. Dabei gilt das Prinzip „first-in-first-out“. Damit unfallrelevante Daten nicht durch andere eventuell fehlausgelöste Ereignisse überschrieben werden können, wurden verschiedene Szenarien definiert, in denen der Datensatz gesperrt im festen Speicher des Steuergeräts hinterlegt werden muss:

- Auslösen eines irreversibles Insassen-Rückhaltesystem
- Bei einem Frontalaufprall, wenn kein Insassen-Rückhaltesystem verbaut ist, bei einer Geschwindigkeitsänderung in x-Richtung um mehr als 25 km/h innerhalb von 150 ms oder weniger
- Aktivierung eines Sicherheitssystems für vulnerable Verkehrsteilnehmer

Wichtig ist außerdem die Definition des Zeitpunktes t_0 des Ereignisses. Dafür muss mindestens eine der folgenden Bedingungen erstmalig erfüllt sein:

- Auslösen der Aktivierung des Steueralgorithmus des Insassen-Rückhaltesystems
- Bei kontinuierlich laufenden Algorithmen
 - o Der Zeitpunkt in dem die kumulierte Geschwindigkeitsänderung innerhalb von 20 ms in Längsrichtung einen Wert von 0,8 km/h oder mehr erreicht
 - o Der Zeitpunkt in dem die kumulierte Geschwindigkeitsänderung innerhalb von 5 ms in Querrichtung einen Wert von 0,8 km/h oder mehr erreicht
- Aktivierung eines irreversiblen Sicherheitssystems für vulnerable Verkehrsteilnehmer

Für die anschließende Datenauswertung sind besonders die Schwellwerte der kontinuierlich laufenden Algorithmen interessant, da diese als Grundlage für den Vergleich verschiedener Schwellwert-Kombinationen dienen. Außerdem soll im Rahmen der Auswertung die Definition des Schwellwertes für t_0 in Richtung der Querschleunigung kritisch hinterfragt werden. Dieser ist, aufgrund des verringerten Zeitintervalls von 5 ms, deutlich höher als der Schwellwert in Längsrichtung.

Für die Schwellwertprüfung ist auch eine Filterung der ungefilterten Beschleunigungssensordaten anderer Messsysteme notwendig. Entsprechend der SAE-Norm J211 werden Beschleunigungsdaten mit Hilfe eines CFC-Filters korrigiert. [22]

2.3.3 Datenfilterung nach SAE J211

Bei der Filterung der Daten beschreibt die UN/ECE-Regelung 160 keine genauen Vorgaben. Im Rahmen dieser Diplomarbeit wird sich deshalb auf die Filterung der Beschleunigungsdaten nach SAE J211 beschränkt. Sie definiert für Crash-Versuche entsprechend der Abtastrate eine Channel Frequency Class (CFC) mit welcher die Daten entsprechend einem Bandpass gefiltert werden sollen. Dabei wird empfohlen, zwei Butterworth-Filter 2. Ordnung hintereinander zu schalten und beim zweiten die Zeitrichtung umzukehren, damit die Phasenverschiebung der Filterung kompensiert wird. Der Filter lässt sich über folgende Gleichungen beschreiben.

$$\omega_d = 1.25 * 2\pi * \frac{CFC}{0.6} * \omega_a \quad (2.5)$$

$$\omega_a = \tan\left(\frac{\omega_d * T}{2}\right) \quad (2.6)$$

$$a_0 = \frac{\omega_a^2}{(1 + \sqrt{2} * \omega_a + \omega_a^2)} \quad (2.7)$$

$$a_1 = 2 * a_0 \quad (2.8)$$

$$a_2 = a_0 \quad (2.9)$$

$$b_1 = \frac{2 * (1 - \omega_a^2)}{(1 + \sqrt{2} * \omega_a + \omega_a^2)} \quad (2.10)$$

$$b_2 = \frac{(1 - \sqrt{2} * \omega_a + \omega_a^2)}{(1 + \sqrt{2} * \omega_a + \omega_a^2)} \quad (2.11)$$

Das gefilterte Signal kann mit folgender Differentialgleichung beschrieben werden.

$$Y(n) = a_0X(n) + a_1X(n - 1) + a_2X(n - 2) - b_1Y(n - 1) - b_2Y(n - 2) \quad (2.12)$$

Umgesetzt in eine Matlab Funktion ergibt sich daraus folgender Programmablaufplan (Abbildung 2.12).

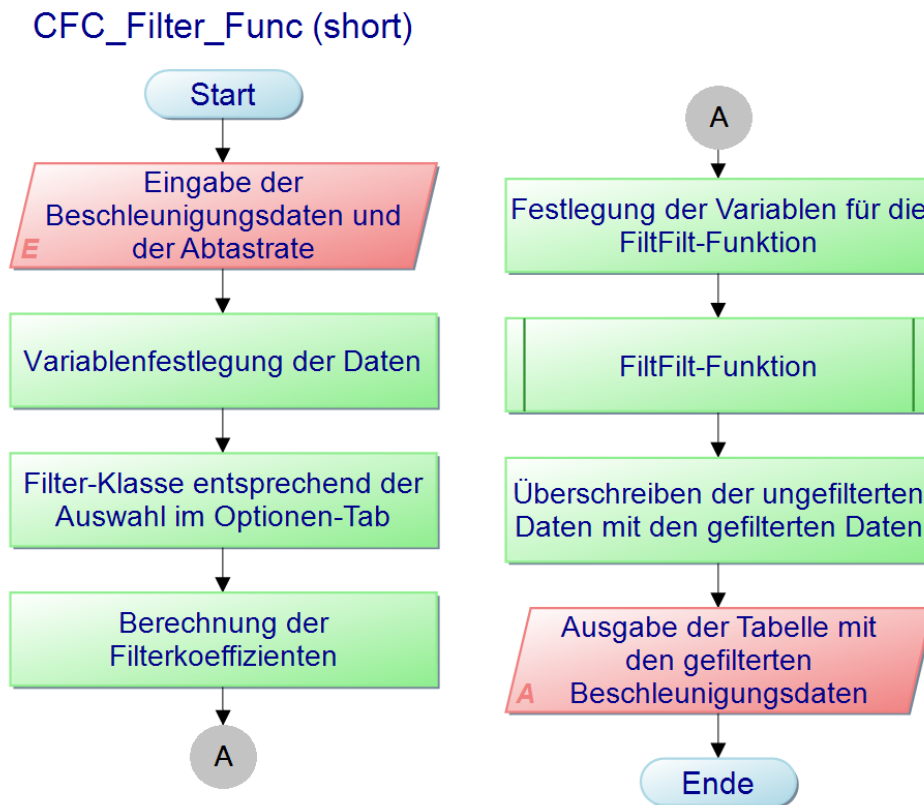


Abbildung 2.12: Programmablaufplan des CFC-Filters (CFC_Filter_Func)

Der komplette Programmablaufplan mit den jeweiligen Berechnungen befindet sich in der Anlage 8.

Für die Filterung auf Basis der Koeffizienten wird die integrierte Funktion `filtfilt` verwendet. Sie kompensiert bei doppelter Ausführung dieses Butterworth Filters 2. Ordnung ebenfalls den Phasenversatz, wie es in der SAE J211 vorgeschrieben ist. [28, 29]

Basierend auf diesen theoretischen Grundlagen lässt sich für die schnelle Verarbeitung der Datensätze eine Matlab-basierte Applikation erstellen. Dabei sollen die Darstellung der Messwerte und die Berechnung von dem Benutzer nachvollzogen werden können. Eine Stapelverarbeitung soll diese Berechnung für alle gewählten Datensätze durchführen und die Ergebnisse anschließend zusammenfassend ausgeben.

3 Erstellung eines Tools für die Auswertung

Im Vorfeld der Diplomarbeit wurden im Januar 2023 mehrere Crash-Versuche mit dem VW Tiguan von Priester und Weyde und einem Biofidel-Dummy durchgeführt. Das Ziel war die Aufnahme von Messdaten verschiedenster Messwertaufnehmer, um die Erkennung von Anstößen von Fahrzeugen mit vulnerablen Verkehrsteilnehmern zu verbessern. Aufgrund der großen Massendifferenz zwischen Fußgänger und Fahrzeug kann dies häufig dazu führen, dass im Falle eines Anstoßes kein Insassen-Rückhaltesystem auslöst. Durch Auswertung der Messdaten der verschiedenen Beschleunigungssensoren sollen Ableitungen in Bezug auf den zu erfüllenden Schwellwert für den Zeitpunkt des Ereignisses t_0 getroffen werden. Zusätzlich wurden mit dem, mit Messtechnik ausgerüsteten, VW Tiguan auch noch vier Versuche im Straßenverkehr von Berlin durchgeführt. Dabei kam es sowohl zu Bordsteinüberfahrten als auch zu stärkeren Bremsungen im innerstädtischen Bereich. Diese Daten bilden für die Schwellwertprüfung fahrdynamische Einzelsituationen ab. Des Weiteren liegen rund 9600 Datensätze der Polizei Berlin aus nachgerüsteten Unfalldatenspeichern (UDS) von behördlichen Fahrzeugen vor, welche ebenfalls auf die Erfüllung möglicher Schwellwert-Kombinationen für t_0 geprüft werden. Die Menge an Daten setzte eine Auswertung in Form einer Stapelverarbeitung voraus. Aufgrund der erlernten Programmier-Kenntnisse während des Studiums wurde dies in einer Matlab-basierten Applikation umgesetzt. Die Umsetzung erfolgte unter Matlab 2024a und ist demzufolge mit der kostenlosen Matlab Runtime 24.1 auch ohne Mathworks-Lizenz nutzbar.

3.1 Konzept für die Matlab-basierte Applikation

Die Applikation sollte benutzerfreundlich und übersichtlich sein und dem Benutzer alle möglichen Funktionen bieten, damit er sich die Daten aus dem Unfalldatenspeicher und den entsprechenden Messsystemen und angeschlossenen Sensoren schnell darstellen und auswerten lassen kann. Als erste Konzeptvorlage zur Umsetzung im Matlab App-Designer diente folgende Abbildung 3.1. Für die Umsetzung stehen im App-Designer verschiedene User Interfaces zur Verfügung und der Entwickler kann sich die Benutzeroberfläche unkompliziert per Drag und Drop zusammenstellen und anschließend anpassen. Im Hintergrund wird dies automatisch in Matlab-Code umgesetzt und der Entwickler implementiert anschließend die Funktionen der Textfelder, Buttons und anderen App-Bausteine. Dabei kann er die Bearbeitung durch den Benutzer unterbinden oder freischalten sowie Teile der Oberfläche deaktivieren, um Benutzereingaben während der Auswertung unterbinden zu können. Diese

3 Erstellung eines Tools für die Auswertung

werden erst nach der laufenden Berechnung ausgeführt, wodurch es zu Verzögerungen oder Fehlern in der Ausführung kommen kann.

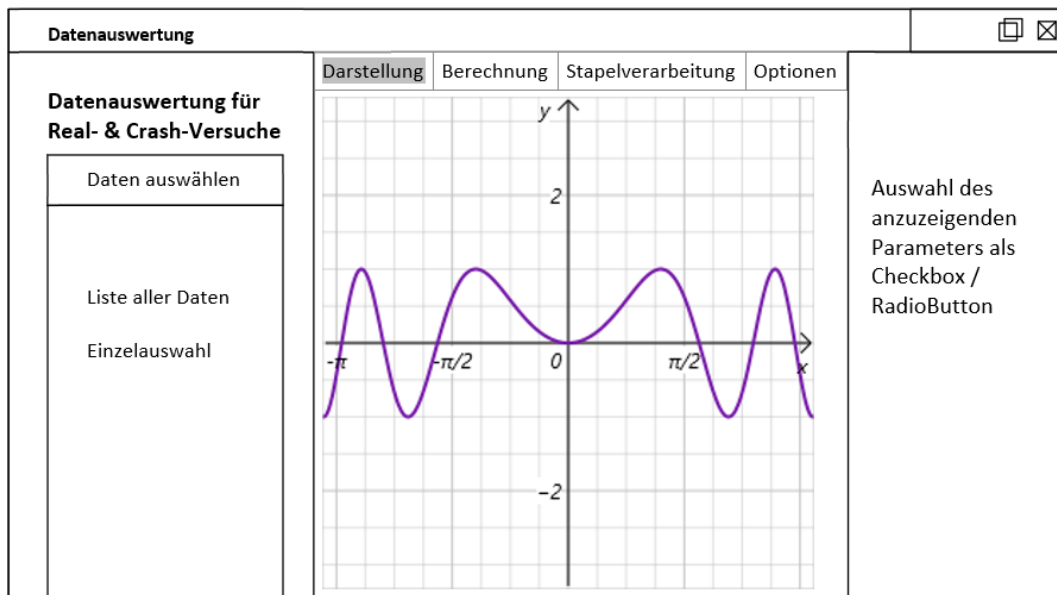


Abbildung 3.1: Konzeptansicht - Benutzeroberfläche "Darstellung"

Die erste Oberfläche der Applikation sollte die Darstellung der eingelesenen Daten umfassen und als Startbildschirm dienen. Der Benutzer soll darin die Möglichkeit haben die Dateien oder den Ordnerpfad auswählen. Anschließend werden alle gefundenen Dateien in einer Liste auf der linken Seite dargestellt. Dabei sollen Datensätze unterschiedlicher Messsysteme bei einheitlicher Testbezeichnung zusammengefasst werden. Nach Auswahl der Datei oder der einheitlichen Testbezeichnung werden die Messdaten eingelesen und die entsprechenden Variablen in einer zweiten Liste der rechten Spalte dargestellt. Außerdem soll mindestens eine Variable bereits initial in einem Plot dargestellt werden. Eine Mehrfach-Auswahlmöglichkeit der gefundenen Parameter kann dann entsprechend der Werte optional zu einer Mehrachsen-Darstellung wechseln. Aufgrund der Mehrfachauswahl bleibt dafür nur die Umsetzung in Form eines Kontrollkästchen-Baumes (engl. CheckNote-Tree). Für die einzelnen Möglichkeiten der Applikation und den Wechsel aus der Darstellungsansicht, ist die Implementierung einer Tabulator-Sektion im mittleren Bereich der Applikation sinnvoll, um schnell zwischen den Schritten hin und her wechseln zu können. Im zweiten Schritt kann der Benutzer dann aus der Darstellung in die Berechnung wechseln, welche schon während des Einlesens der Daten für eine relevante Variable durchgeführt wurde.

Der zweite Tabulator soll deshalb die Berechnung umfassen. Hier werden dem Benutzer entsprechend der Auswahl des Schwellwertes die jeweiligen Berechnungen für das ausgewählte Messsystem angezeigt. Dafür soll, neben einer grafischen Darstellung in einem Plot, auch das Maximum und Minimum des Parameters sowie die maximale Differenz dargestellt werden.

Wenn die Differenz des Parameters einen unter Optionen festgelegten Schwellwert überschreitet, dann würde im Ergebnistextfeld ein entsprechender Text ausgegeben werden. Dadurch dass in diesem Schritt immer nur ein Parameter ausgewertet und berechnet werden kann, muss die Mehrfachselektion des CheckNote-Tree im rechten Abschnitt deaktiviert werden. Außerdem müssen die für die Berechnung relevanten Parameter, in diesem Falle Messdaten von Beschleunigungssensoren, aus den Datensätzen herausgesucht werden, damit die Berechnung nicht auf unmöglichen Parametern, wie beispielsweise den GPS-Koordinaten, durchgeführt wird. Die Umsetzung in Form einer Radio Button-Group ist in dem Falle naheliegend. Damit kann sichergestellt werden, dass es zwei unabhängige Auswahlmöglichkeiten gibt und man jederzeit zwischen Berechnung und Darstellung hin und her wechseln kann, ohne die Darstellung im jeweils anderen Tab von einer geänderten Auswahl zu beeinflussen. Wenn mindestens eine Datei erfolgreich eingelesen und berechnet wurde, soll außerdem die Option einer Stapelverarbeitung für den Benutzer möglich sein.

Die Stapelverarbeitung ist dementsprechend der dritte Tab und soll die Berechnung, die vorher noch im Berechnungs-Tab durchgeführt und visualisiert wurde, für alle Parameter und alle ausgewählten Messdaten automatisch durchführen und das Ergebnis in einer Ausgabedatei abspeichern. Dafür muss die vorherige Einfachselektion in der Liste der Dateien auf der linken Seite aufgehoben und eine Mehrfachselektion implementiert werden. Eine Darstellung im rechten Abschnitt und eine Auswahl von Parametern ist in dieser Funktion irrelevant. Nach Ausführung einer Stapelverarbeitung und dem damit verbundenen Einlesen von mehreren Dateien, muss der Wechsel in den Darstellungs- oder Berechnungs-Tab mit einem erneuten Einlesen und Berechnen der zuvor gewählten einheitlichen Testbezeichnung verbunden sein. Wenn man die dabei eingelesenen Daten in einer Variable hinterlegt, entfällt die Zeit des erneuten Einlesens und es muss lediglich die Darstellung und Berechnung erneut ausgeführt werden. Dies kann allerdings mit zunehmender Datenmenge zu einer Auslastung des Arbeitsspeichers führen. Während der Stapelverarbeitung sollten außerdem die Interaktionen des Benutzers mit der Applikation weitestgehend unterbunden werden. Wie bereits erwähnt, führen Matlab-basierte Applikationen die Benutzereingaben, die während eines Prozesses getätigt werden, erst im Anschluss an diesen aus. In einem Textfeld soll außerdem der aktuelle Status sowie die aktuelle Datei ausgegeben werden. Zusätzlich zeigt ein Zähler die aktuell verarbeitete Datei in Abhängigkeit der Anzahl der gewählten Datensätze an. Damit kann der Benutzer jederzeit abschätzen, wie lange die Auswertung noch läuft. Der allgemeine Ablauf der Auswertung ist in folgendem Programmablaufplan (Abbildung 3.2 oder Anlage 7) dargestellt.

3 Erstellung eines Tools für die Auswertung

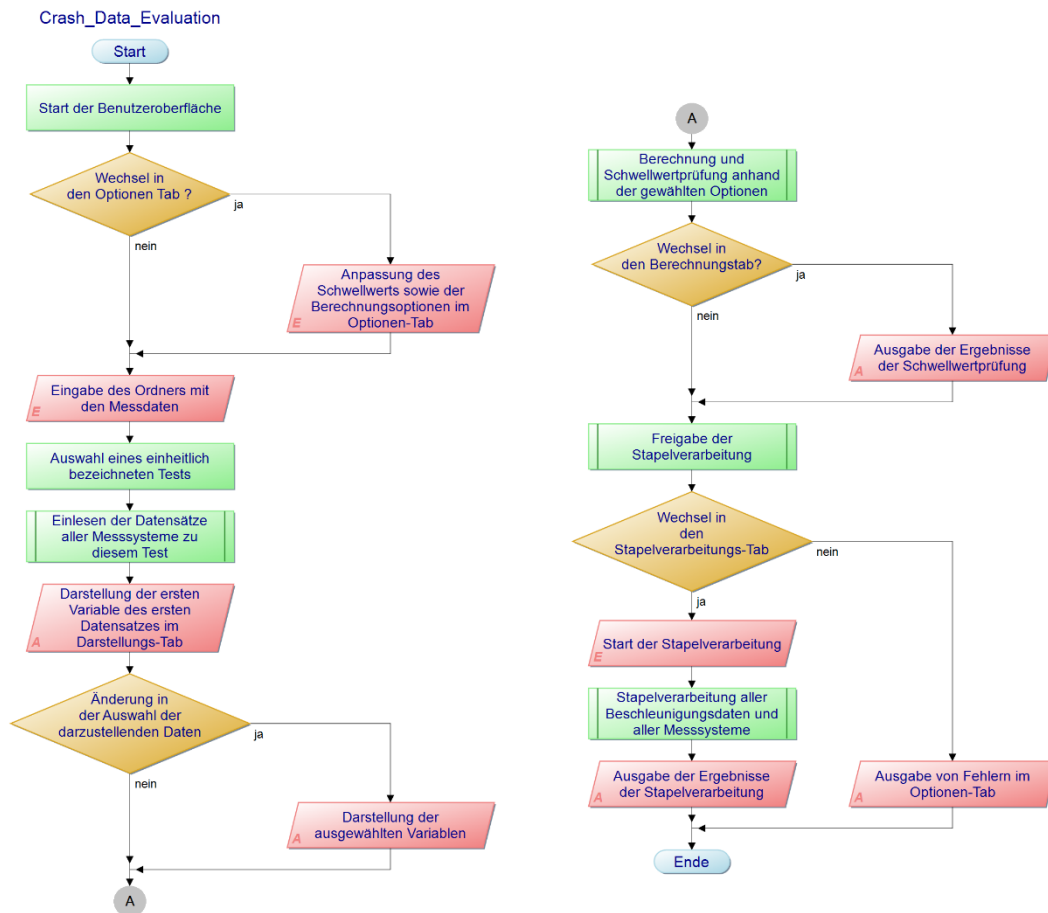


Abbildung 3.2: Programmablaufplan Crash-Data-Evaluation

Diese drei Optionen (Darstellung/Berechnung/Stapelverarbeitung) sollten im Zuge der Diplomarbeit in der Applikation implementiert werden. Dazu sollte es zusätzlich möglich sein, den Schwellwert anzupassen, um verschiedene Schwellwert-Kombinationen mit der gesetzlichen Anforderung zu vergleichen. Ein zusätzlicher Optionen-Tab fasst alle Anpassungsmöglichkeiten für Schwellwerte und Parameter der Auswertung zusammen.

Unter Optionen können dann die verschiedenen Parameter ausgewählt und der Schwellwert angepasst werden. In der UN/ECE-Regelung 160 wird der Schwellwert im Falle eines nichtauslösenden Airbags mit einer Geschwindigkeitsänderung (Δv) von 8 km/h innerhalb von 150 ms definiert. Der Zeitpunkt Null des Ereignisses (t_0) kann bei kontinuierlich laufenden Algorithmen definiert werden, wenn Δv in Längsrichtung mindestens 0,8 km/h innerhalb von 20 ms bzw. in Querrichtung innerhalb von 5 ms beträgt. Die gesetzliche Vorlage bezieht sich dabei nur auf die Δv -Berechnung. Alternativ könnte aber auch die Beschleunigungsdifferenz sowie der maximale Ruck oder der mittlere Ruck innerhalb eines Zeitintervalls ausgewertet werden, um auf mögliche Anstöße zu schließen. Diese Optionen sollten nach Rücksprache ebenfalls implementiert werden. Außerdem kann es bei nicht kalibrierten Beschleunigungssensoren zu einem Offset in Höhe der Erdbeschleunigung in vertikaler

Richtung kommen. Die Erdbeschleunigung zum Zeitpunkt der Messung soll deshalb vom Benutzer definiert werden können. Die SAE Norm J211 setzt zudem eine Filterung von ungefilterten Beschleunigungsdaten voraus, wenn diese nicht im Vorfeld, wie beispielsweise beim Unfalldatenspeicher, bereits gefiltert wurden. Deshalb soll der Benutzer aus den gängigsten CFC-Filtern auswählen können, um die jeweiligen Rohdaten der Sensoren nachträglich zu filtern. Sollte die Abtastrate der Sensoren oder des Systems jedoch für die Auswertung zu gering sein, kann eine Interpolations- (Upsampling) und Dezimationsoption (Downsampling) die Daten beispielsweise bei geringerer Abtastrate vor der Auswertung linear interpolieren. Das Textfeld in diesem Tab gibt alle Fehler, die während der Ausführung der Applikation aufgetreten sind, in Textform aus.

Anschließend wurden die verschiedenen Elemente mit Funktionen hinterlegt und die Unterfunktionen der Applikation programmiert.

3.2 Einlesen der Daten und Visualisierung

Der Kern der Applikation ist das Einlesen der verschiedenen Messdateien mit unterschiedlichen Dateiformaten und jeweils eigenen Datenstrukturen. Zu Beginn der Diplomarbeit wurden ausschließlich die XML-Dateien aus den Unfalldatenspeichern eingelesen, da diese mit den integrierten Funktionen `readtable` und `readstruct` in Matlab problemlos eingelesen werden konnten. Nach Einlesen einer XML-Datei resultiert daraus eine Tabelle mit den Messdaten, deren Variablen anschließend in einer Liste (CheckNote-Tree) im rechten Abschnitt aufgelistet werden. Dabei müssen die Variablen auf Sonderzeichen geprüft und diese verändert werden, da Matlab keine Variablenbezeichnung mit einem Sonderzeichen zulässt. Das gleiche gilt bei der Ausgabe von Dateien für den jeweiligen Speichernamen. Deshalb wurde eine Funktion „`spec_char_test_func`“ implementiert, die sowohl die in den Messdaten gefundenen Variablen als auch die Ausgabedateinamen auf Sonderzeichen prüft und diese bei Bedarf mit Unterstrichen korrigiert. Umlaute werden hingegen in ihrer ausgeschriebenen Form korrigiert. Beispielsweise wird ein „ä“ durch ein „ae“ ersetzt. Der Programmablaufplan zu dieser Funktion ist in folgender Abbildung 3.3, sowie umfassend in Anlage 9, dargestellt.

3 Erstellung eines Tools für die Auswertung

Spec_Char_Test_Func (short)

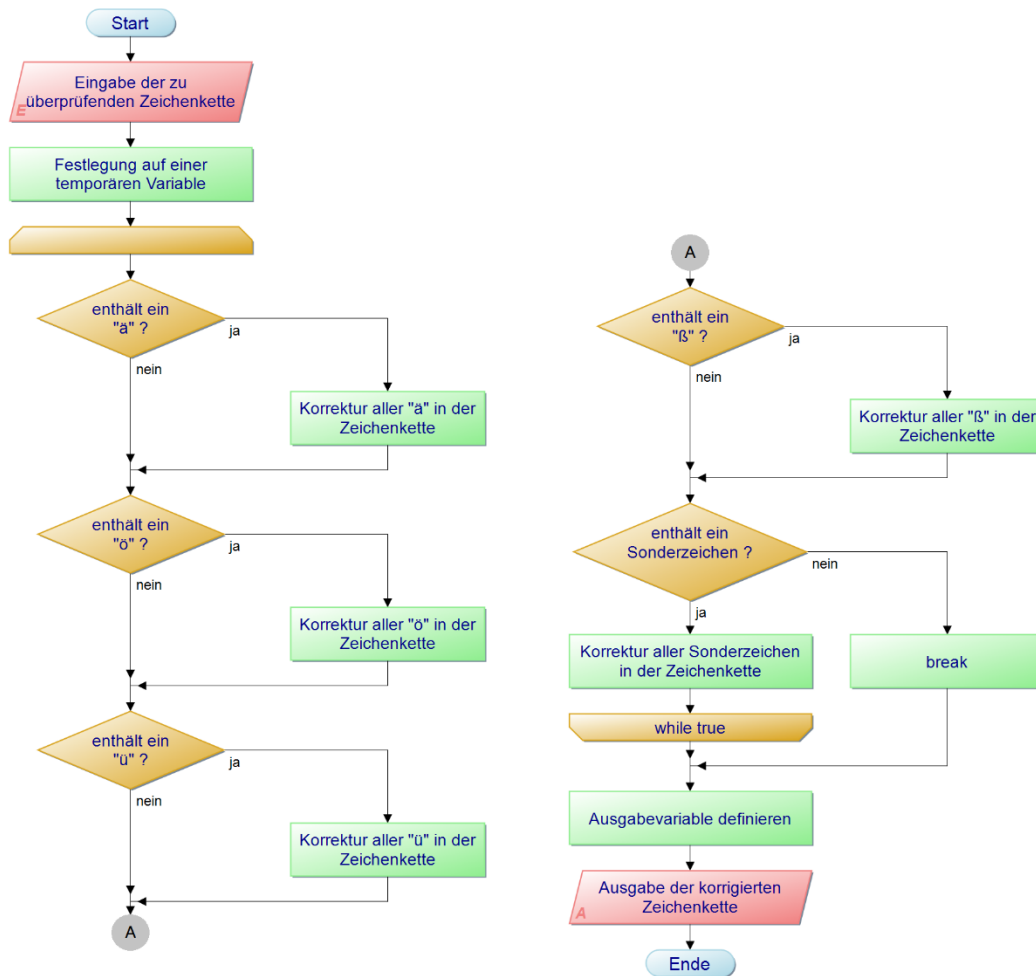


Abbildung 3.3: Programmablaufplan der Sonderzeichenprüfung (Spec_Char_Test_Func)

Initial wird nach dem Einlesen der Daten die erste Variable, welche im CheckNote-Tree automatisch ausgewählt wird, als Plot dargestellt. Die aktivierte Mehrfachauswahl im CheckNote-Tree erlaubt die Darstellung mehrerer Signale. Bei zu großer Abweichung der Maxima und Minima zwischen den Signalen werden diese in einem Mehrachs-Plot mit der Funktion yyaxis dargestellt. Beispielhaft ist das in folgender Abbildung 3.4 zu sehen.

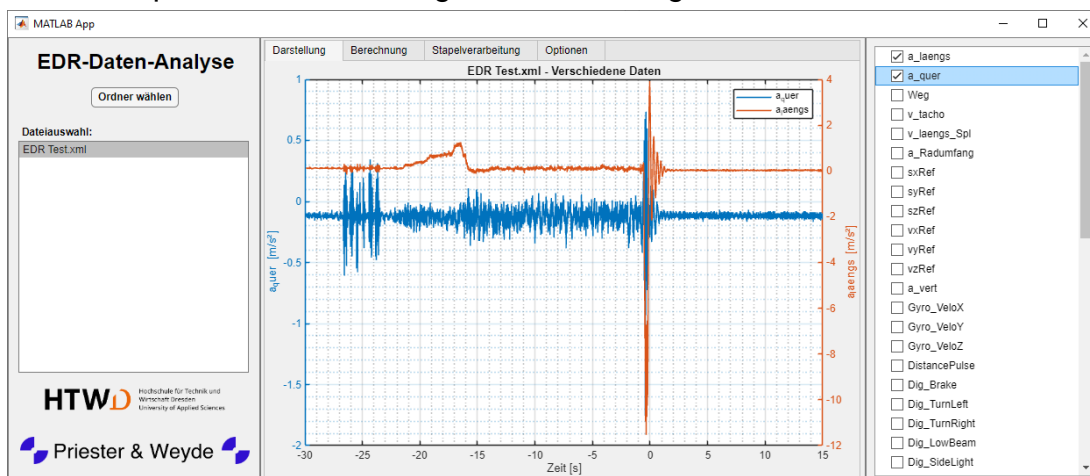


Abbildung 3.4: Benutzeroberfläche "Darstellung" mit 2-Achsen-Darstellung

3 Erstellung eines Tools für die Auswertung

Bei Darstellung in zwei Achsen kann es zu einem automatischen Wechsel des Linientyps kommen, wenn zwischen den Achsen hin und her gewechselt wird. Aus diesem Grund werden die Farben in einem definierten Bereich in einem RGB-Code festgelegt. Dabei besitzt die linke Achse immer einen Blau-Wert von 255 und einen Rot-Wert von 0. Der Grün-Wert von 255 wird mit einer Zufallszahl im Bereich von 0 bis 1 multipliziert, um eine Farbvariation der linken Achse zu bewirken. Die gleiche Berechnung wird für die rechte Achse mit einem festen Rot-Wert von 255 und einem Blau-Wert von 0 durchgeführt. Auch in diesem Fall wird ebenfalls der Grün-Wert variiert. Die Darstellung erfolgt als Zeitreihe des Parameters mit Hilfe des Plot-Befehls.

Im Zuge der Besprechungen zu dieser Diplomarbeit sollte das Einlesen der Messdaten über den Unfalldatenspeicher hinaus ausgedehnt werden. In den Versuchen von Priester und Weyde im Rahmen des Projekts mit der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) wurde das Fahrzeug mit verschiedener Messtechnik ausgerüstet. Jedes Messsystem erzeugte dabei eigene Messdaten in eigenen Dateiformaten mit jeweils speziellen Datenstrukturen. Die Applikation sollte all diese Daten einlesen können und wurde deshalb entsprechend erweitert. Dafür war es notwendig eine Ordnerstruktur festzulegen, in der die Messdaten abgelegt werden. Die definierte Ordnerstruktur ist in folgender Abbildung 3.5 dargestellt.

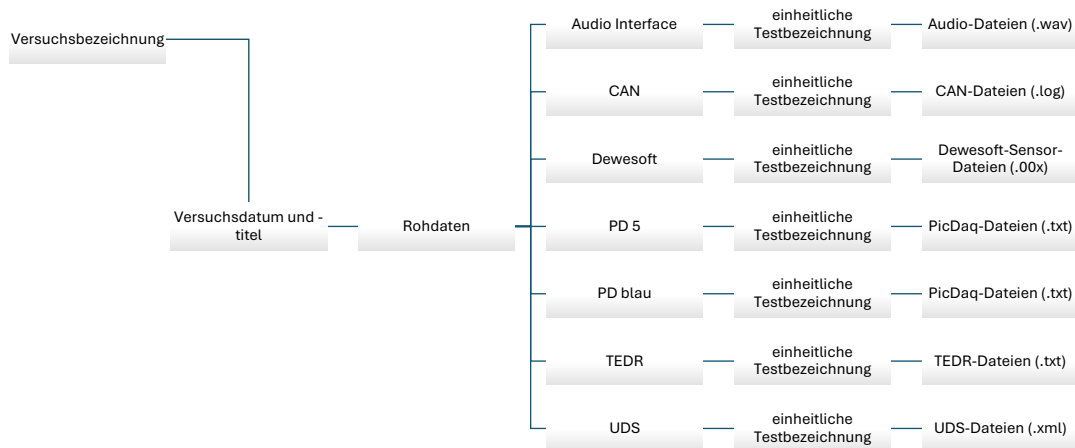


Abbildung 3.5: Vorschlag für die definierte Ordnerstruktur der Messdaten

Beginnend bei vorangehenden Ordnern mit Versuchsbezeichnung sowie Datum und Titel des Versuchs müssen alle Messdateien im Ordner „Rohdaten“ abgelegt werden. Darunter sind Ordner für die entsprechenden Messsysteme angelegt. In jedem Messsystem-Ordner sind dann die verschiedenen Tests als Unterordner hinterlegt. Die einheitliche Bezeichnung dieser Tests ist ausschlaggebend für die Zuordnung der einzelnen Messsysteme zu einem

gemeinsamen Versuch. Diese Ordnerstruktur ermöglicht das Einlesen aller Messdateien der verschiedenen Messsysteme eines Versuchs, wenn dieser in der Listbox in der linken Spalte der Applikation ausgewählt wurde. Dabei fängt das Programm auch Fehlbenennungen mit dem Ordernamen „Versuch ...“ anstatt „Test ...“ ab und korrigiert diese für die Weiterberechnung entsprechend. In den Unterordnern mit der Messsystem-Bezeichnung liegen dann die Messdateien in den eigenen Dateiformaten. Diese Dateiverwaltung orientiert sich an den, auf den Servern von Priester und Weyde abgelegten Dateien. Dabei müssen nur die UDS-Daten aus dem Ordner „Messdaten“ in den Ordner „Rohdaten“ überführt werden und es bedarf keiner weiteren Änderung vorhandener Strukturen. Dies dient zudem der Reduzierung des Aufwandes für die spätere Verwendung der Applikation. Beispielhaft ist die Ordnerstruktur für den Test 7-U-01 vom 04.01.2023 in Anlage 10 dargestellt.

Die Erweiterung des Einlesens weiterer Messdaten erforderte eine individuelle Unterfunktion für jeden Dateityp und jedes Messsystem, da jede Datei mit einer eigenen Datenstruktur aufgebaut ist.

Die Daten des Audio-Interfaces, welches beispielsweise den Körperschall aufgezeichnet hat, können als WAV-Dateien mit der integrierten Funktion `audioread` eingelesen werden.

Die CAN-Daten hingegen waren bereits in einer vorherigen Diplomarbeit entschlüsselt und aufbereitet und in einer Excel-Datei abgelegt worden. Diese wäre unkompliziert in Matlab einlesbar gewesen. Das Problem dabei war allerdings, dass für jedes Signal auf dem CAN-Bus ein separates Sheet angelegt wurde, in dem die Daten für das jeweilige Signal gespeichert waren. In Summe waren es mehr als 800 entschlüsselte CAN-Signale also mehr als 800 Sheets in einer Excel-Datei. Der Ressourcen-Bedarf und vor allem auch die Berechnungszeit für die CAN-Signale waren dementsprechend hoch und für eine Stapelverarbeitung nicht mehr vertretbar. Aus diesem Grund wurde im Laufe der Diplomarbeit die Einlesefunktion der CAN-Dateien angepasst. Es werden jetzt die Rohdaten des CAN als LOG-Dateien eingelesen und mit Hilfe einer Vector-Datenbank, welche unter Optionen auch verändert werden kann, eingelesen und entschlüsselt. Sowohl die Ausgabe-Funktionen `canMessageTimetable` und `canSignalTimetable` als auch die Funktion zum Einlesen einer Datenbank `canDatabase` werden vom AppDesigner unterstützt und können in einer StandAlone-Applikation verwendet werden. Dabei wurden alle aufgezeichneten Kanäle zusammengefasst ausgewertet. Für den VW Tiguan der VW-internen Plattform MQB wird die Datenbank für die Benutzung mitgeliefert und installiert. Die entschlüsselten CAN-Signale liegen anschließend in einer Zeit-Tabelle (`TimeTable`) vor und können als solche weiterverarbeitet werden.

Die Messdaten der Sensoren des Dewesoft-Systems bestehen ebenfalls aus einer Text-Datei, welche je Kanal des Messsystems mit einer

3 Erstellung eines Tools für die Auswertung

fortlaufenden Nummerierung des Dateiformates (.00x), wobei x für die Nummer des Kanals steht, gespeichert wurden. Die Sensorkonfiguration ist dabei im Kopf der Datei abgelegt und anschließend folgen die Sensorsignale in Tabellenform. Diese können, wie schon die XML-Dateien des Unfalldatenspeichers, mit der Funktion `readtable` eingelesen werden. In den Kopfdaten der Datei lassen sich dann der Zeitpunkt des Starts sowie die Abtastrate für die weitere Berechnung entnehmen. Die Datei muss um diese Kopfdaten innerhalb der Applikation gekürzt werden, da die `readtable` Funktion ansonsten nur diese in eine Tabelle umwandelt.

Die Datensätze der beiden PicDAQ-Messsysteme sind annähernd gleich aufgebaut und bestehen aus Tabellen im TXT-Dateiformat. Vorangestellt an die Tabellen mit den Messdaten sind die Sensitivitäten für die einzelnen Kanäle des Systems. Auch hier können die Messdaten mit der Funktion `readtable` eingelesen werden. Das Problem der PicDAQ-Dateien ist die fehlende Zuordnung der jeweils gemessenen Signale zu den einzelnen analogen und digitalen Kanälen des Messsystems. Für zukünftige Messungen bedarf es unter Umständen der Anpassung dieser Bezeichnungen, da an den entsprechenden Kanälen vielleicht andere Sensoren angebracht oder die Messpunkte variiert werden. Aus diesem Grund wurde eine zusätzliche Excel-Datei implementiert, welche zu Beginn des Programmstarts geladen wird und die jeweiligen Bezeichnungen für die Kanäle der PicDAQ-Systeme sowie des Dewesoft-Systems enthält. Außerdem lässt sich in einer separaten Spalte jeweils die Orientierung festlegen. Dies kann wichtig sein, wenn wie im Beispiel der Datensätze aus den Crash-Versuchen mit dem VW Tiguan ein Sensor oder Messsystem so eingebaut ist, dass y und z-Achse vertauscht sind und die Richtungen der Sensorachsen nicht mit denen des Fahrzeugkoordinatensystems nach DIN ISO 8855 entsprechen. Sollte die Datei beim Start der Applikation im entsprechenden Ordner nicht vorhanden sein, wird sie neu erstellt. Für die Versuche mit dem VW Tiguan sollte die Zuordnung wie folgt aussehen (Abbildung 3.6).

	A	B	C	D	E	F	G
1	Kanal	PD 5	Orientation_PD 5	PD blau	Orientation_PD blau	Dewesoft	Orientation_Dewesoft
2	A1	Gyro_x	1	Gyro_y	1	Control_Unit_a_x	1
3	A2	Gyro_z	-1	Gyro_x	-1	Control_Unit_a_y	1
4	A3	Gyro_y	1	Gyro_z	1	Control_Unit_a_z	-1
5	A4	a_x_low	1	ACM_a_y	1	Bracket_FR_a_x	1
6	A5	a_z_low	-1	ACM_a_x	-1	Bracket_FR_a_y	1
7	A6	a_y_low	1	-	0	Bracket_FR_a_z	1
8	A7	a_x_high	1	-	0	Bracket_FL_a_x	1
9	A8	a_z_high	-1	-	0	Bracket_FL_a_y	1
10	A9	a_y_high	1	-	0	Unknown	1
11	A10	-	0	Fahrpedal	1	-	0
12	D1	Tapeswitch_Anstoss	1	Tapeswitch_Anstoss	1	-	0
13	D2	Bremspedal_Fzg	1	Bremspedal_Fzg	1	-	0
14	D3	Tapeswitch_Bremspedal	1	Tapeswitch_Bremsped	1	-	0

Abbildung 3.6: Excel-Datei zur Festlegung der Bezeichnung der verschiedenen Messkanäle

Zuletzt sollten noch die Daten aus dem Airbag-Steuergerät eingelesen werden. Diese als Triggered EDR (TEDR) bezeichneten Messdaten sind als TXT-Dateien gespeichert. Dabei umfasst eine Datei ein Sensor-Signal des

3 Erstellung eines Tools für die Auswertung

Ereignisdatenspeichers. Die Pedestrian Protection (PP)-Sensoren sind im Stoßfänger verbaut und als Druck- oder Beschleunigungssensoren ausgeführt. Sie sind ausschlaggebend für die Auslösung eines Schutzsystems für vulnerable Verkehrsteilnehmer wie beispielsweise der Anhebung der Motorhaube. Außerdem enthalten die TEDR-Daten die Beschleunigungssignale des 2-Achsen-Beschleunigungssensors in x- und y-Richtung des Airbag-Steuergeräts (ACM). Jede Datei enthält dabei einen Kopf mit der Sensorkonfiguration sowie die Zeitreihe der Messwerte. Erreicht wurde diese Speicherung durch den Kurzschluss einer herausgeführten Messleitung aus dem Airbag-Steuergerät. Ein Kurzschluss dieser Leitung löste den internen Speicheralgorithmus in den festen Speicher des Steuergeräts aus. Aus diesem wurden sie im Zuge der Auswertung ausgelesen und konnten in der Applikation mit Hilfe der `readtable` Funktion eingelesen und anschließend weiterverarbeitet werden.

Für die Auswahl und den Wechsel zwischen den Messdaten der einzelnen Messsysteme wurde ein Dropdown-Menü oberhalb der Liste der Parameter implementiert. Dadurch kann man sich vor der Stapelverarbeitung die Daten jedes Messsystems visualisieren, die entsprechende Berechnung überprüfen und gegebenenfalls die Schwellwerte variieren, bevor man die Stapelverarbeitung startet.

Außerdem musste das Programm für das Einlesen der bereits vorbereiteten Tabellen im CSV-Dateiformat aus den Datensätzen der Polizei Berlin erneut um eine Einlesefunktion erweitert werden. Da es neben diesen aufbereiteten Daten keine anderen Messdaten im CSV-Dateiformat gibt, wurde dies über eine Auswahl unterhalb des „Ordner wählen“-Buttons gesteuert. Der Benutzer hat die Möglichkeit zwischen klassischen UDS-Daten im XML-Dateiformat und den aufbereiteten Daten aus den Polizei-Unfalldatenspeichern im CSV-Dateiformat zu wählen. Die Auswahl beeinflusst nicht die anschließende Berechnung, da es sich rein um das Dateiformat für die Messdaten des Unfalldatenspeichers handelt. In der finalen Version sieht die Benutzeroberfläche in der Darstellung deshalb wie folgt aus (siehe Abbildung 3.7).

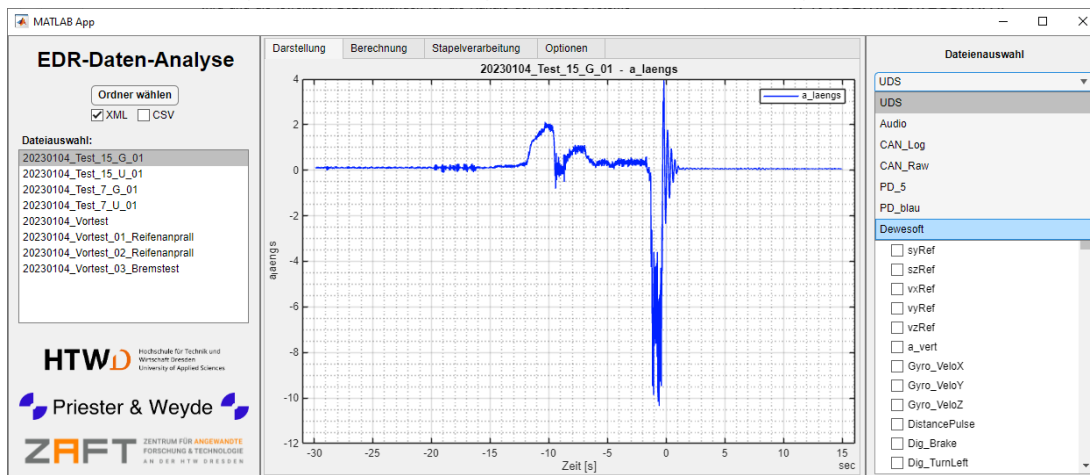


Abbildung 3.7: Implementierung eines Dropdown-Menüs zum Wechsel des Messsystems

Das vollumfängliche Einlesen der Messdaten der verschiedenen Messsysteme war nur der erste Schritt im Rahmen der Erstellung der Applikation. In den nachfolgenden Kapiteln geht es um die Weiterverarbeitung der eingelesenen Daten der verschiedenen Beschleunigungssensoren und die Berechnung der Geschwindigkeitsänderung und des Rucks.

3.3 Berechnung der Geschwindigkeitsänderung

Während den Crash-Versuchen mit dem VW Tiguan haben verschiedene Beschleunigungssensoren an verschiedenen Messpunkten im Fahrzeug Messdaten aufgezeichnet. Für die gesetzlichen Anforderungen entsprechend der UN/ECE-Regelung 160 müssen diese mit einer Mindest-Abtastrate von 500 Hz aufgezeichnet werden, um daraus die Geschwindigkeitsänderung Δv errechnen zu können. Die Geschwindigkeitsänderung ist das Integral der Beschleunigung und wird mit folgender Formel berechnet [30].

$$a = \frac{dv}{dt} \quad (3.1)$$

$$dv = \int a dt \quad (3.2)$$

Basierend auf dieser Formel kann man die Geschwindigkeitsänderungen in Matlab hinreichend genau mit der integrierten Formel `cumtrapz` berechnen. Diese bildet die kumulierte trapezförmige numerische Integration ab und berechnet je Zeitinkrement dt das Integral des eingegebenen numerischen Vektors. Dabei muss zusätzlich erwähnt werden, dass die Applikation die Daten wie vorher beschrieben in der Standard-Einstellung auf eine Abtastrate von 1000 Hz linear interpoliert bzw. von höheren Abtastraten dezimiert. Anschließend wird in einer For-Schleife der numerische Vektor des Beschleunigungssensors auf die Länge des festgelegten Zeitfensters gekürzt und mit dem gekürzten Zeitvektor in der `cumtrapz` Funktion zur Geschwindigkeitsänderung berechnet. Das Maximum des von der Funktion ausgegebenen Vektors ist dann die maximale Geschwindigkeitsänderung innerhalb dieses Zeitfensters. Anschließend wird das Zeitfenster im Rahmen der For-Schleife um ein Zeitinkrement nach hinten versetzt und die Berechnung mit dem neuen Abschnitt des Beschleunigungsvektors erneut durchgeführt. Dementsprechend werden die gesamten Beschleunigungsmessdaten geprüft und jeweils das Maximum in einem neuen Vektor abgelegt. Damit dieser die gleiche Länge wie die Messdaten besitzt, werden in der For-Schleife der gekürzte Beschleunigungs- und Zeitvektor am Anfang der Schleife von 1 bis zur Länge des Zeitfensters schrittweise verlängert. Deshalb erfolgt die Berechnung der ersten Δv -Werte auf kürzeren Zeitfenstern. Dies ermöglicht aber eine Erkennung des Zeitpunktes Null an dem die kumulierte Geschwindigkeitsänderung bezogen auf die vorangegangenen Werte den Schwellwert überschritten hat. Zudem

haben dadurch der resultierende Vektor der maximalen Geschwindigkeitsänderung und der numerische Vektor des Beschleunigungssensors die gleiche Länge und können in der TimeTable zusammengefasst werden. Anschließend wird das Maximum des Vektors der Geschwindigkeitsänderung für die Weiterberechnung und Ausgabe im Berechnungs-Tab ermittelt.

3.4 Berechnung des Rucks

Für den Ruck muss der numerische Beschleunigungsvektor differenziert werden. Das funktioniert in Matlab mit Hilfe der integrierten diff-Funktion. Diese Berechnung wird für den Beschleunigungsvektor und den Zeitvektor durchgeführt und anschließend werden die beiden im Quotienten mit folgender Formel berechnet [30].

$$j = \frac{da}{dt} \approx \frac{\Delta a}{\Delta t} \quad (3.3)$$

Der resultierende Ruckvektor ist jedoch aufgrund der diff-Funktion ein Element kürzer als der Beschleunigungsvektor und wird deshalb um eine vorangestellte Null ergänzt. Anschließend wird auch dieser Vektor in der TimeTable als zusätzliche Variable hinterlegt. Wenn unter Optionen der Ruck als Schwellwert gewählt wurde, eröffnet sich dem Benutzer die Möglichkeit der Auswahl der zugrundeliegenden Ruck-Berechnung. Als Standard ist die Mean-Berechnung gewählt. Dabei wird der auf Basis der Messdaten der Beschleunigungssensoren berechnete Ruck auf die Länge des gewählten Zeitfensters gekürzt und dann der Mean-Wert berechnet. Dies erfolgt ähnlich der Geschwindigkeitsänderung für die gesamte Länge des Vektors. Bei Auswahl der Median-CheckBox erfolgt die Berechnung äquivalent mit der Median-Funktion. Die Auswahl von „Max – Min“ berechnet die maximale Differenz des gekürzten Vektors, indem er zuerst sortiert wird und anschließend die Differenz aus letztem und erstem Wert des Vektors bestimmt wird. Bei Auswahl der Max-CheckBox erfolgt keine weitere Berechnung. Es wird lediglich der maximale Ruck im Datensatz aus dem Ruckvektor bestimmt und in der Ergebnisdatei ausgegeben.

Die letzte Berechnungsoption ist die Bestimmung der maximalen Beschleunigungsdifferenz. Dafür wird der Beschleunigungsvektor auf die Länge des Schwellwert-Zeitintervalls gekürzt und die maximale Beschleunigungsdifferenz innerhalb dieses gekürzten Vektors bestimmt. Dies wird, wie auch bei der Geschwindigkeitsänderungsberechnung, in einer For-Schleife für den gesamten Beschleunigungsvektor durchgeführt. Da diese Auswertung von der Automobilindustrie nicht favorisiert wird, aber nach Rücksprache trotzdem implementiert werden soll, wird in der nachfolgenden Auswertung der Ergebnisse nicht darauf eingegangen.

3 Erstellung eines Tools für die Auswertung

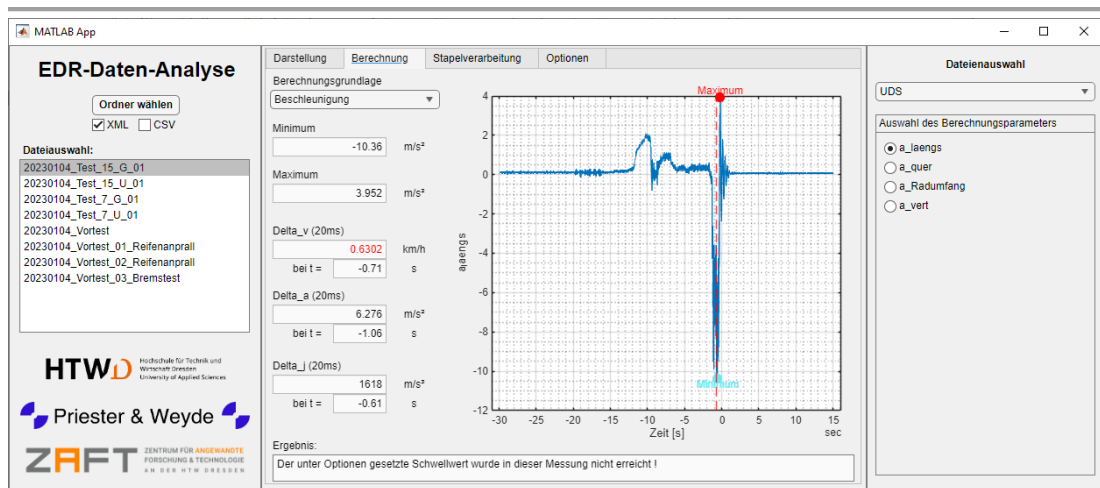


Abbildung 3.8: Benutzeroberfläche "Berechnung"

Im Berechnungs-Tab werden im weiteren Verlauf die Ergebnisse der Berechnungen ausgegeben und mit dem gewählten Schwellwert verglichen. Im Beispiel der Abbildung 3.8 wurde der gesetzliche Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms für den Zeitpunkt t_0 in diesem Datensatz des Unfalldatenspeichers nicht erreicht.

Um die Nachvollziehbarkeit der Applikation zu verbessern, wurde zusätzlich ein Button für die Ausgabe der aktuell verarbeiteten Daten unterhalb des CheckNote-Tree bzw. der Radio-Button-Group implementiert. Dieser gibt bei Betätigung im Darstellungs-Tab die aktuelle Zeitreihe des gewählten Werts oder der gewählten Werte des CheckNote-Tree als Excel-Datei im XLSX-Dateiformat aus. Bei Betätigung des Buttons im Berechnungs-Tab hingegen erfolgt die Ausgabe einer Tabelle mit den berechneten Daten für den Ruck, die Beschleunigungsdifferenz und die Geschwindigkeitsänderung für den gewählten Berechnungsparameter. Dadurch ist es möglich, die Berechnungen nachzuvollziehen und die Daten können auch extern weiterverarbeitet werden.

Zur Variation des Schwellwerts und der erneuten Berechnung der Geschwindigkeitsänderung, des Rucks und der maximalen Beschleunigungsdifferenz sowie dem Vergleich mit der neuen Schwellwert-Kombination, musste die Applikation unter Optionen um Möglichkeiten der Anpassung der Parameter erweitert werden. Dazu zählten sowohl die Anpassung des Schwellwerts sowie des Zeitfensters zum Erreichen des Schwellwertes als auch weitere Optionen der Filter-Auswahl und ähnlichem. Dies wird im folgenden Kapitel näher beschrieben.

3.5 Implementierung einer Schwellwertanpassung

Das Programm sollte, wie bereits erwähnt, eine Anpassung des Schwellwertes ermöglichen, um verschiedene Schwellwert-Kombinationen in den Datensätzen zu prüfen. Dabei galt es sowohl die gesetzlich geforderte Schwellwertprüfung eines Δv innerhalb eines Zeitintervalls (Δt) als auch eine

Ruckberechnung zu integrieren. Zusätzlich sollte die maximale Beschleunigungsänderung Δa innerhalb des Zeitintervalls ausgewertet werden, auch wenn die Automobilindustrie diese Variante momentan, vermutlich aufgrund des möglichen Sensorrauschens sowie Drifts bei Alterung, nicht als Alternative in Betracht zieht. Die Schwellwert-Prüfung soll dabei immer nur für einen Parameter durchgeführt werden. Aus diesem Grund wurden unter „Optionen“ drei verschiedene Auswahlmöglichkeiten in Form von Check-Boxen implementiert.

Die gesetzliche Vorgabe schreibt eine Speicherung vor, wenn innerhalb von 150 ms eine Geschwindigkeitsänderung von mehr als 8 km/h erreicht wurde. Dabei wird der Zeitpunkt t_0 als der Punkt definiert, an dem die Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung innerhalb von 20 ms bzw. in Querrichtung innerhalb von 5 ms größer als 0,8 km/h ist.

Die vorliegenden Datensätze der Polizei aus realen Aufzeichnungen von Unfalldatenspeichern wurden dahingehend auf folgende Schwellwert-Kombinationen geprüft:

- Δv von größer 0,8 km/h innerhalb von 20 ms in Längsrichtung sowie innerhalb von 5 ms (bzw. 20 ms) in Querrichtung [22]
- Δv von größer 0,5 km/h innerhalb von 10 ms in Längsrichtung sowie innerhalb von 5 ms (bzw. 10 ms) in Querrichtung
- Δv von größer 0,25 km/h innerhalb eines Zeitfensters von 5 ms in Längs- und Querrichtung
- Eine iterative Bestimmung eines Ruck-Schwellwertes aus dem maximalen Ruck sowie als Mean-Wert innerhalb eines Zeitfensters von 5 ms

Alternativ kam im Rahmen einer Besprechung zu dieser Diplomarbeit die Idee, aus den Beschleunigungssignalen der drei Raumachsen, diese zu einer resultierenden Beschleunigung zusammenzufassen. Deshalb wurden die Optionen um diese Anpassung erweitert. Zwei CheckBoxen erlauben die Auswahl einer zusätzlichen Berechnung einer resultierenden Beschleunigung in x- und y-Richtung bzw. in x-, y- und z-Richtung. Die Auswahl dieser Option muss vor der Berechnung der ersten Messdatei erfolgen. Vergleichend zu den Schwellwertkombinationen sollte diesbezüglich ebenfalls ein iterativer Schwellwert für eine resultierende Beschleunigung bei Δv größer 0,8 km/h innerhalb von 20 ms ermittelt werden.

Die Anzahl an Datensätzen, vorrangig aus den Unfalldatenspeichern der Polizei Berlin, machte es notwendig, eine Stapelverarbeitung in der Applikation zu integrieren. Die Anwendung sollte dabei die Berechnungen für jeden Parameter jedes Datensatzes wiederholend durchführen und die Ergebnisse zusammenfassend in einer Ergebnisdatei ausgeben. Dies wird im folgenden Kapitel näher beschrieben.

3.6 Stapelverarbeitung mehrerer Datensätze

Die zuvor beschriebenen Berechnungen auf Basis der Signale der Beschleunigungssensoren sowie die Prüfung auf Erfüllung des Schwellwertes sollten repetitiv für jeden Sensor und jeden Datensatz ausgeführt werden. Für die schnelle und effektive Verarbeitung der Daten wurde eine Stapelverarbeitung implementiert.

Eine CheckBox ermöglicht die vereinfachte Auswahl aller Messdateien bzw. Testbezeichnungen. Bei Aktivierung werden automatisch alle Einträge in der Listbox auf der linken Seite gewählt. Eine weitere Option ist die Ausgabe der Ergebnisdatensätze in separaten Ordnern. Dabei wird für jeden Datensatz mit einheitlicher Testbezeichnung ein eigener Ordner erstellt, in dem die Tabellen der Beschleunigungssignale abgelegt werden, welche den unter „Optionen“ definierten Schwellwert während der Stapelverarbeitung überschritten. Sobald der Button „Stapelverarbeitung Starten“ betätigt wurde, wird das Interface der Applikation zum Großteil deaktiviert, um Benutzereingaben währenddessen zu unterbinden. Der aktuelle Status sowie die jeweilige Dateibezeichnung werden im jeweiligen EditField ausgegeben. Im Textfeld ist dies noch einmal zusammengefasst und es erfolgt zusätzlich eine Ausgabe des Prozentsatzes an Parametern, welche den Schwellwert überschritten haben. Ein Zähler gibt den Fortschritt der Stapelverarbeitung an. Die Messdaten der Beschleunigungssensoren, die den Schwellwert überschritten haben, werden zusätzlich als separate Excel-Datei im XLSX-Dateiformat im Ergebnis-Ordner ausgegeben. Aus der Stapelverarbeitung resultiert zudem eine Tabelle mit den maximalen Berechnungswerten aller Beschleunigungssignale in Bezug auf den vorher definierten Schwellwert. Ist der Schwellwert beispielsweise als Δv innerhalb von Δt definiert, enthält die Tabelle die maximalen berechneten Δv -Werte aus den jeweiligen Beschleunigungssignalen. Diese Ausgabe ist unabhängig davon, ob der unter „Optionen“ definierte Schwellwert überschritten wurde. Die daraus entstandenen Dateien dienen im Nachfolgenden zur statistischen Auswertung der Datensätze der Unfalldatenspeicher der Polizei-Berlin.

Da Matlab-basierte Applikationen die Benutzereingaben während laufenden Berechnungen erst im Anschluss an deren Abschluss verarbeiten, wurde ein State-Button auf der Benutzeroberfläche der Stapelverarbeitung hinterlegt. Sobald die Stapelverarbeitung einmal gestartet ist, wird dieser auf „sichtbar“ gestellt. Möchte der Benutzer die Stapelverarbeitung nach der aktuellen Datei abbrechen, muss er diesen State-Button nur einmal betätigen, bis dieser aktiviert (ausgegraut) ist. Zu Beginn des Einlesens jeder Datei wird der Status dieses Buttons geprüft. Ist er betätigt, unterbricht er die Stapelverarbeitung und beendet sie mit der Ausgabe der Ergebnisdatei im Anschluss an die Berechnung des aktuellen Datensatzes.

3 Erstellung eines Tools für die Auswertung

Diese Stapelverarbeitung wurde jeweils einmal je Schwellwertkombination für die rund 9600 Datensätze der Polizei Berlin, die Datensätze aus den 19 Versuchen mit dem VW Tiguan und dem Biofidel-Dummy sowie den aufgezeichneten Messdaten der verbauten Messtechnik des VW Tiguan während der StreetProbe-Versuche im Straßenverkehr von Berlin durchgeführt. Die Ergebnisse dieser statistischen Auswertungen werden im nachfolgenden Kapitel betrachtet.

4 Ergebnisse der Auswertung

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurden Daten aus drei verschiedenen Quellen verarbeitet und ausgewertet. Grundlage waren rund 9600 Datensätze der Polizei Berlin, welche im Rahmen von Unfalluntersuchungen aus behördlichen Fahrzeugen ausgelesen wurden. Dabei stellt aber nicht jeder Datensatz einen Unfall dar, denn der nachgerüstete Unfalldatenspeicher weist eine geringere Auslöseschwelle als der gesetzliche EDR auf. Diese Datensätze stellen aber einen repräsentativen Anteil für eine Auswertung von Unfällen und Grenzsituationen im Straßenverkehr dar, die zur Auslösung einer Speicherung führten. Des Weiteren wurden 19 Versuche mit dem VW Tiguan von Priester und Weyde in Kooperation mit der TU Berlin durchgeführt. Dabei wurden frontale Fußgängerkollisionen bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten mit Hilfe eines Biofidel-Dummys nachgestellt. Das Fahrzeug war dafür nachträglich mit verschiedenster Messtechnik und einer Vielzahl an Beschleunigungssensoren ausgerüstet. Mit verringerter Anzahl an Messtechnik wurden anschließend noch vier Versuche im Straßenverkehr von Berlin mit dem VW Tiguan gefahren und aufgezeichnet.

Die Ergebnisse der Auswertung dieser Daten sind in diesem Kapitel zusammengefasst.

4.1 Unfalldatenspeicher der Polizei Berlin

Als Basis der ersten Auswertung dienten die 9569 Datensätze der Polizei Berlin. Die Daten stammen aus nachgerüsteten Unfalldatenspeichern (UDS) von behördlichen Fahrzeugen, welche meist im Rahmen von Unfallermittlungen im Zeitraum von 2015 bis 2016 sowie von 2020 bis 2021 ausgelesen und gesichert wurden. Diese Datenspeicher sind eine Erweiterung zur bestehenden Elektronik des Fahrzeugs und ähneln von den aufgezeichneten Parametern her dem Ereignisdatenspeicher. Die Auslöseschwelle für eine Speicherung ist vom Geräte-Hersteller Kienzle festgelegt worden und liegt niedriger als beim EDR. Aus diesem Grund lösen UDS auch in fahrdynamischen Grenzsituationen aus und nicht jede Speicherung oder Datei stellt einen Unfall dar. Deshalb kann die Anzahl dieser Datensätze bereits als repräsentative Menge für die Auswertung von Unfällen und fahrdynamischen Grenzsituationen genutzt werden und es lassen sich Aussagen treffen, inwieweit Schwellwert-Variationen sinnvoll sind. Dazu ist zu erwähnen, dass die Speichereinträge bereits beim Auslesen gefiltert und anschließend im XML-Dateiformat abgelegt werden. Eine Übersicht über die Anzahl an Datensätzen je Jahr ist in der folgenden Tabelle 4.1 dargestellt.

4 Ergebnisse der Auswertung

Tabelle 4.1: Übersicht über die Datensätze je Jahr

	2015	2016	2020	2021	Σ
Datensätze	61	1173	3848	4487	9569
davon fehlerhaft	0	2	12	20	34
verbleibend	61	1171	3836	4467	9535

In der Diplomarbeit von Bockenheimer [31] wurden diese Datensätze bereits in Matlab eingelesen, anonymisiert und im CSV-Dateiformat gespeichert. Mit Hilfe der entwickelten Applikation wurden sie in der Stapelverarbeitung verarbeitet und die Ergebnisse der dabei erstellten Excel-Dateien statistisch in einem separaten Skript ausgewertet. Jede Schwellwertkombination erforderte dabei eine separate Stapelverarbeitung aller Datensätze. Dementsprechend war die Berechnungszeit je Datei von entscheidender Bedeutung und konnte im Zuge von Verbesserungen der Algorithmen bis auf 8 s je Datei gesenkt werden. Dies bedeutet für die Auswertung einer Schwellwertkombination eine Gesamtberechnungszeit von knapp 21 Stunden. Die Ergebnisse aus den Stapelverarbeitungen dienen im nachfolgenden zur statistischen Auswertung der Geschwindigkeitsänderung basierend auf der Längs- und Querschleunigung. Außerdem wurde die resultierende Beschleunigung aus der Längs-, Quer- und Vertikalbeschleunigung berechnet und ein iterativer Schwellwert für Δv bestimmt. Zusätzlich wurde auch der maximale Ruck sowie ein mittlerer Ruck innerhalb des Zeitintervalls von 5 ms in den Datensätzen ermittelt und vergleichend zu den Geschwindigkeitsänderungen betrachtet. Die Darstellungen der Geschwindigkeitsänderungen beziehen sich dabei innerhalb der Kapitel zunächst auf die Prüfung des gesetzlichen Schwellwerts von t_0 mit Δv größer als 0,8 km/h innerhalb von 20 ms in Längsrichtung sowie innerhalb von 5 ms in Querrichtung. Die Darstellungen der Auswertungen der weiteren Schwellwert-Kombinationen befinden sich in der Anlage 29 bis Anlage 58. Auf sie wird nur vergleichend eingegangen.

4.1.1 Auswertung der Längsbeschleunigung

Für die Auswertung der Längsbeschleunigung bezogen auf den Schwellwert für den Zeitpunkt des Ereignisses t_0 werden die Daten zunächst in einem Scatter-Plot, wie in folgender Abbildung 4.1 oder Anlage 11 zu sehen, dargestellt. Dabei stellen die Kreuze die jeweilige maximale Geschwindigkeitsänderung basierend auf der Längsbeschleunigung innerhalb des Zeitintervalls eines UDS-Datensatzes dar. Der Schwellwert ist mit einer roten yline dargestellt. Alle Geschwindigkeitsänderungen, die oberhalb dieser liegen, werden zusätzlich rot umkreist. Zudem wird in einem Textfeld innerhalb des Plots der Prozentsatz an UDS-Datensätzen angegeben, welche den Schwellwert überschritten haben.

4 Ergebnisse der Auswertung

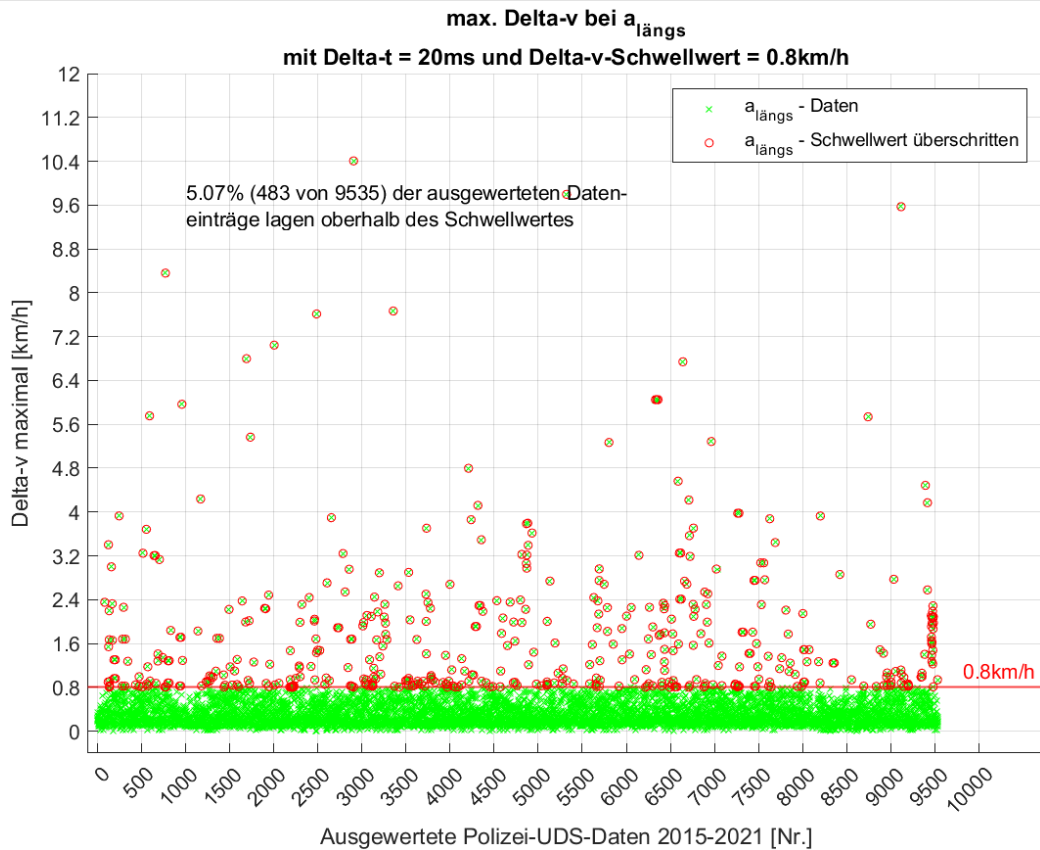


Abbildung 4.1: maximale Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)

Im Falle der Auswertung des Δv Schwellwertes von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms erfüllten 5,07% der Datensätze (483 von 9535) die Schwellwertprüfung und wiesen eine gleiche oder höhere Geschwindigkeitsänderung auf. Die Darstellung der Ergebnisse in einem Balkendiagramm mit Hilfe der Histogramm-Funktion, wie in Abbildung 4.2 oder Anlage 21, zeigt die Verteilung der einzelnen Geschwindigkeitsänderungen in Richtung der Längsbeschleunigung. Dabei wurde eine Schrittweite (bin_width) zwischen den Balken von 0,2 gewählt, um die Übersichtlichkeit des Diagramms zu verbessern. Die negative Exponentialfunktion, welche sich mit Hilfe der Datensätze abbilden lässt, ist dabei deutlich zu erkennen. Dies war zu erwarten, da der Unfalldatenspeicher eine geringere Auslöseschwelle als der gesetzlich verpflichtende EDR besitzt und bereits bei fahrdynamischen Grenzsituationen im normalen Straßenverkehr auslösen kann. Erwartungsgemäß sollten insgesamt zwischen 5-10% der ausgewerteten Daten ein Unfallereignis darstellen. Für die bessere Darstellung wurden außerdem die Anzahl an Datensätzen oberhalb der Balken sowie eine Skala in Form eines Prozentsatzes auf 100% (9535 Datensätze) auf der 2. Achse ergänzt. Zusätzlich wurden alle Ergebnisse, die größer als das fünf-fache des Schwellwertes sind, zu einem Balken zusammengefasst.

4 Ergebnisse der Auswertung

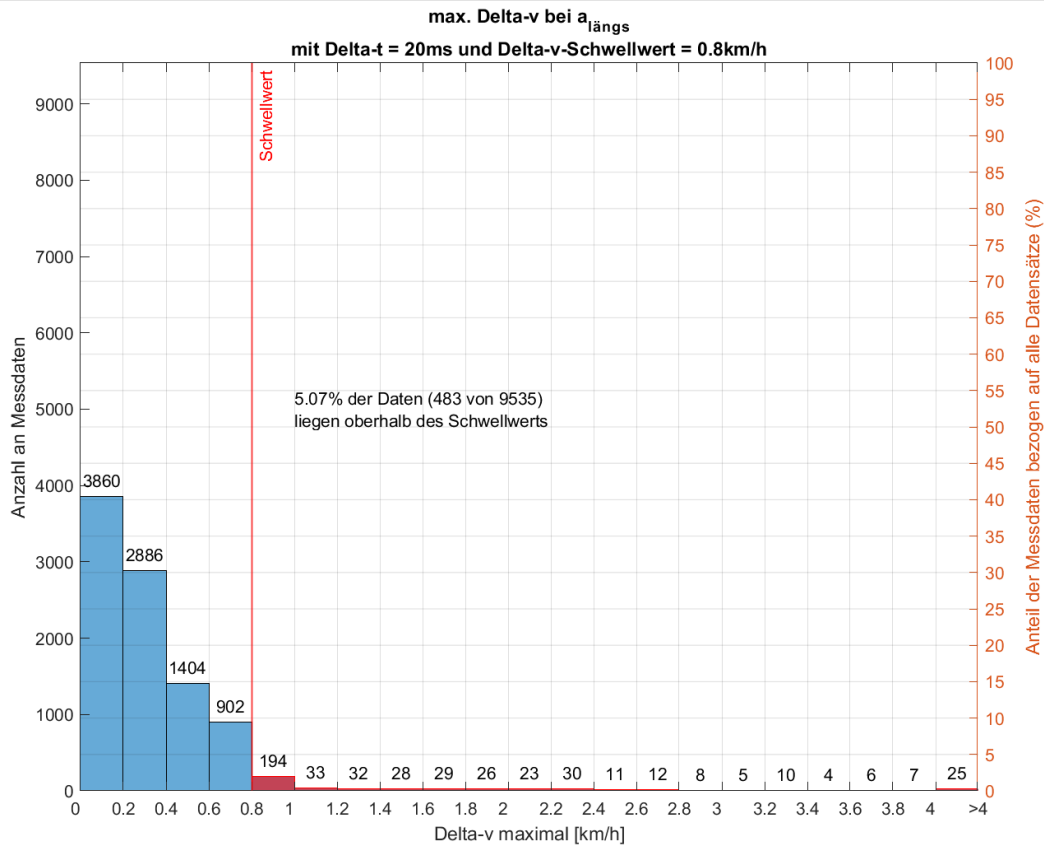


Abbildung 4.2: prozentuale Auswertung der Geschwindigkeitsänderung aller Datensätze in Längsrichtung (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)

Betrachtet man ausschließlich die Datensätze, welche oberhalb des Schwellwertes liegen, kann man die Verteilung der Geschwindigkeitsänderung der 483 Datensätze auch prozentual, wie in nachfolgender Abbildung 4.3 oder Anlage 22, darstellen. Dabei ist zu erkennen, dass die meisten Ereignisse mit 40,2% im Bereich der Geschwindigkeitsänderung zwischen 0,8 und 1,0 km/h liegen. Auch hier wurden die Datensätze, bei denen die Geschwindigkeitsänderung größer als das fünffache des Schwellwerts war, in einem Balken am Ende zusammengefasst, da diese definitiv als Unfall identifizierbar sind. Die Auswertung zeigt erneut die negative Exponentialfunktion der Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen in den Datensätzen.

4 Ergebnisse der Auswertung

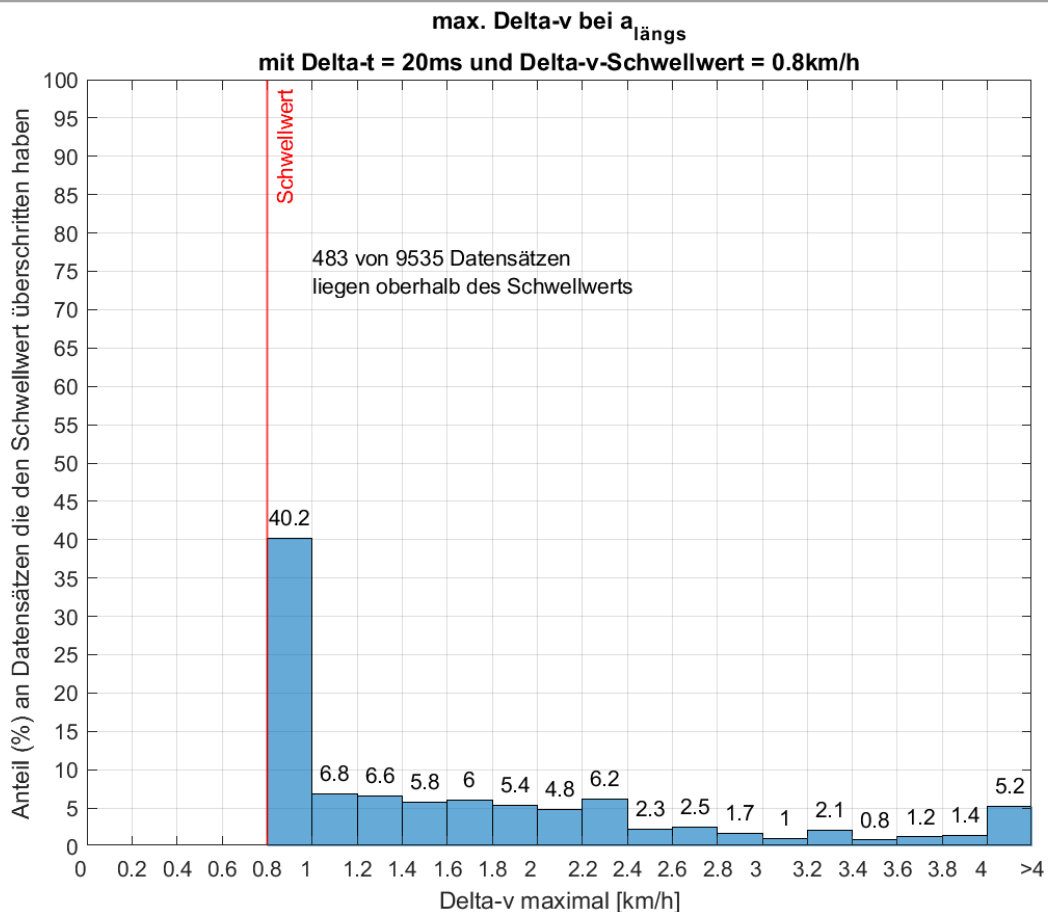


Abbildung 4.3: prozentuale Auswertung der Geschwindigkeitsänderung bei Überschreiten des Schwellwerts in Längsrichtung (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)

Eine Reduzierung des Zeitintervalls sowie des Δv Schwellwertes in Richtung der Längsbeschleunigung führte zu einem abnehmenden Prozentsatz der Datensätze, die den Schwellwert überschreiten. Im Falle einer Geschwindigkeitsänderung von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms erfüllen nur noch 3,38% (322 von 9535) und bei 0,25 km/h innerhalb von 5 ms nur 3,52% (336 von 9535) die Schwellwertprüfung. Ein Vorteil der Reduzierung des Zeitintervalls sowie der Geschwindigkeitsänderung wäre die geringe Anzahl an Speicherungen im Ereignisdatenspeicher. Dabei besteht aber die Gefahr, dass geringe Anstöße, wie beispielsweise mit vulnerablen Verkehrsteilnehmern, eventuell nicht erfasst und gespeichert werden.

Bei der Ermittlung der maximalen Geschwindigkeitsänderung innerhalb von 5 ms muss erwähnt werden, dass die Auswertung auf Basis, der auf 1000 Hz linear interpolierten Daten erfolgte. Die ursprüngliche Abtastrate von 500 Hz hätte sonst nur eine Auswertung von der Zeitintervalle von 4 ms bzw. 6 ms ermöglicht. Da zwischen diesen Datenpunkten linear interpoliert wird, sollte die Berechnung hinreichend genau sein. Dies wird im nachfolgenden Kapitel der Fehlerbetrachtung näher untersucht.

Da es sinnvoll ist, die Datensätze, welche den Schwellwert erfüllen, weiter zu verarbeiten, wäre der nächste Schritt eine Umkehrung der Anonymisierung der Datensätze und die Prüfung auf einen tatsächlichen Unfall. Da dies

4 Ergebnisse der Auswertung

nach Rücksprache den Umfang dieser Diplomarbeit übersteigen würde, wurde dies nur vorbereitet. Die Dateinamen der Datensätze, welche den Schwellwert überschritten haben, wurden in einer Matlab-Datei sowie in einer Excel-Tabelle ausgegeben und stehen auf dem beiliegenden Medium zur Verfügung.

Nach Betrachtung der Geschwindigkeitsänderung auf Basis der Längsbeschleunigung kann diese Auswertung ebenfalls für die Querschleunigung durchgeführt werden.

4.1.2 Auswertung der Querschleunigung

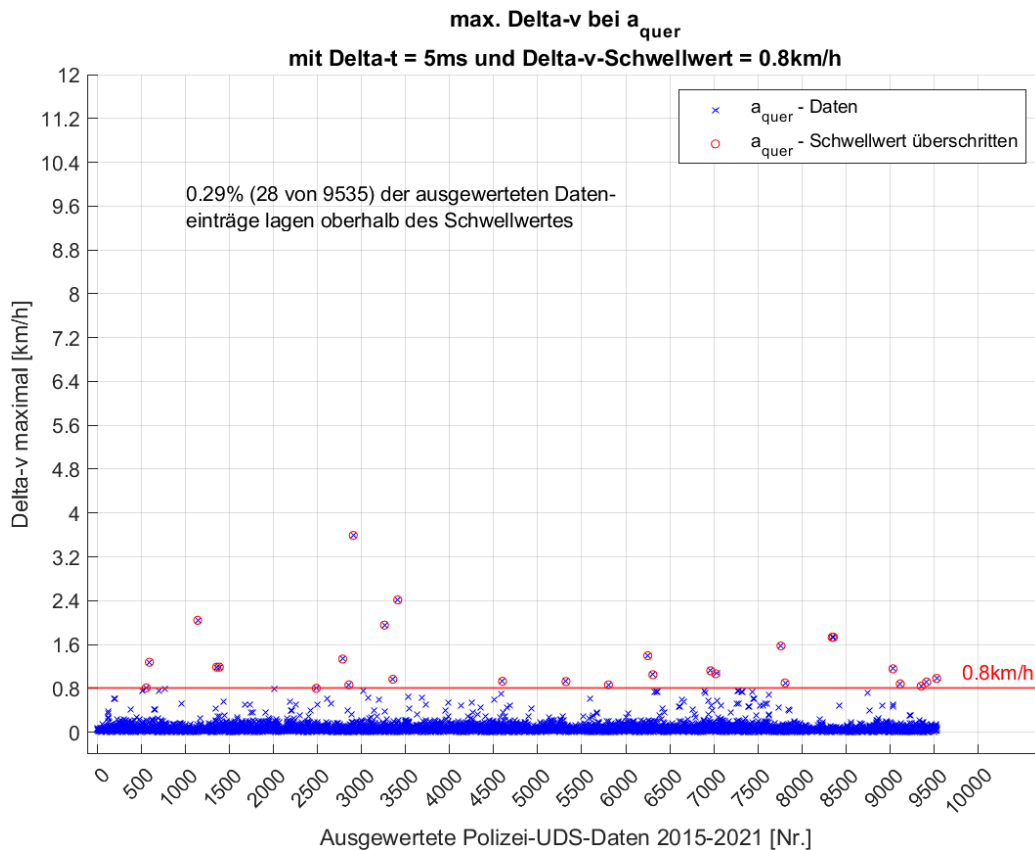


Abbildung 4.4: maximale Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung (0,8 km/h innerhalb von 5 ms)

Die Auswertung der Querschleunigung erfolgt äquivalent zu der Auswertung der Längsbeschleunigung. Zu beachten ist dabei aber der gesetzliche Schwellwert für t_0 und das veränderte Zeitintervall. Hierbei handelt es sich um eine Geschwindigkeitsänderung von mindestens 0,8 km/h innerhalb eines Zeitfensters von 5 ms, wie in Abbildung 4.4 oder Anlage 12 zu sehen ist. Aus diesem Grund wurde für die erste Auswertung der Querschleunigung das Zeitfenster nicht variiert. Stattdessen wurde vorerst nur der Schwellwert für die Geschwindigkeitsänderung innerhalb von 5 ms angepasst.

Dabei ist zu beobachten, dass aufgrund der einmaligen Auswertung innerhalb von 5 ms der Anteil an den Schwellwert erfüllenden Datensätzen steigt, da die Schwelle von 0,8 km/h auf 0,5 km/h und danach 0,25 km/h gesenkt wird und dabei mehr Datensätze die Schwellwertprüfung erfüllen. Im Falle der Auswertung im Vergleich mit der gesetzlichen Anforderung erfüllen

4 Ergebnisse der Auswertung

nur 0,29% bzw. 28 von 9535 Datensätzen den Schwellwert. Der geringere Prozentsatz lässt Rückschlüsse darauf zu, dass es häufiger zu frontal wirkenden als zu seitlich wirkenden Unfällen mit den behördlichen Fahrzeugen kommt.

Äquivalent zu der Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Richtung der Längsbeschleunigung wird die Verteilung in Querrichtung in einem Histogramm dargestellt. Dies ist in folgender Abbildung 4.5 oder Anlage 23 zu sehen.

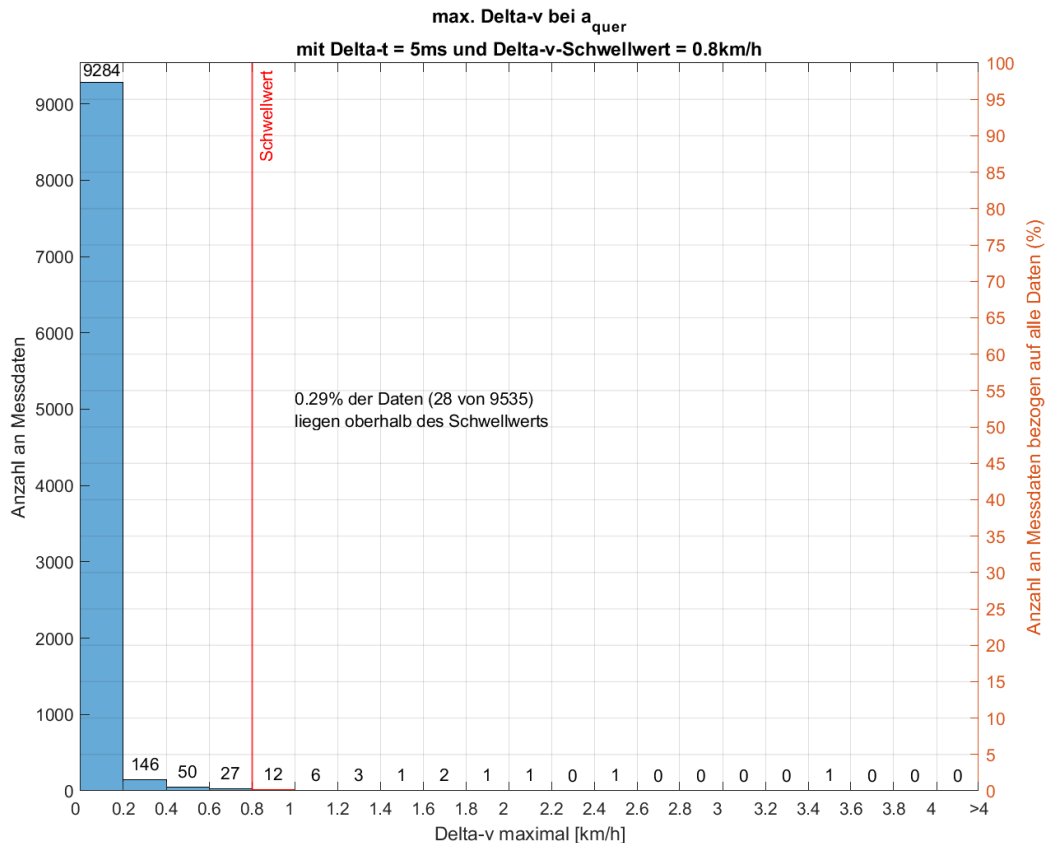


Abbildung 4.5: prozentuale Auswertung der Geschwindigkeitsänderung aller Datensätze in Querrichtung (0,8 km/h innerhalb von 5 ms)

In diesem Diagramm ist deutlich zu erkennen, dass über 95% der Datensätze eine Geschwindigkeitsänderung von 0 bis 0,2 km/h innerhalb von 5 ms aufweisen. Aus diesem Grund sind alle Werte darüber als mögliche Schwellwerte denkbar und es unterstützt die eingangs gewählten Schwellwertkombinationen.

Betrachtet man die Geschwindigkeitsänderung von Datensätzen, die den Schwellwert erfüllen, anschließend erneut prozentual in einem Balkendiagramm erhält man folgende Abbildung 4.6 bzw. Anlage 24.

4 Ergebnisse der Auswertung

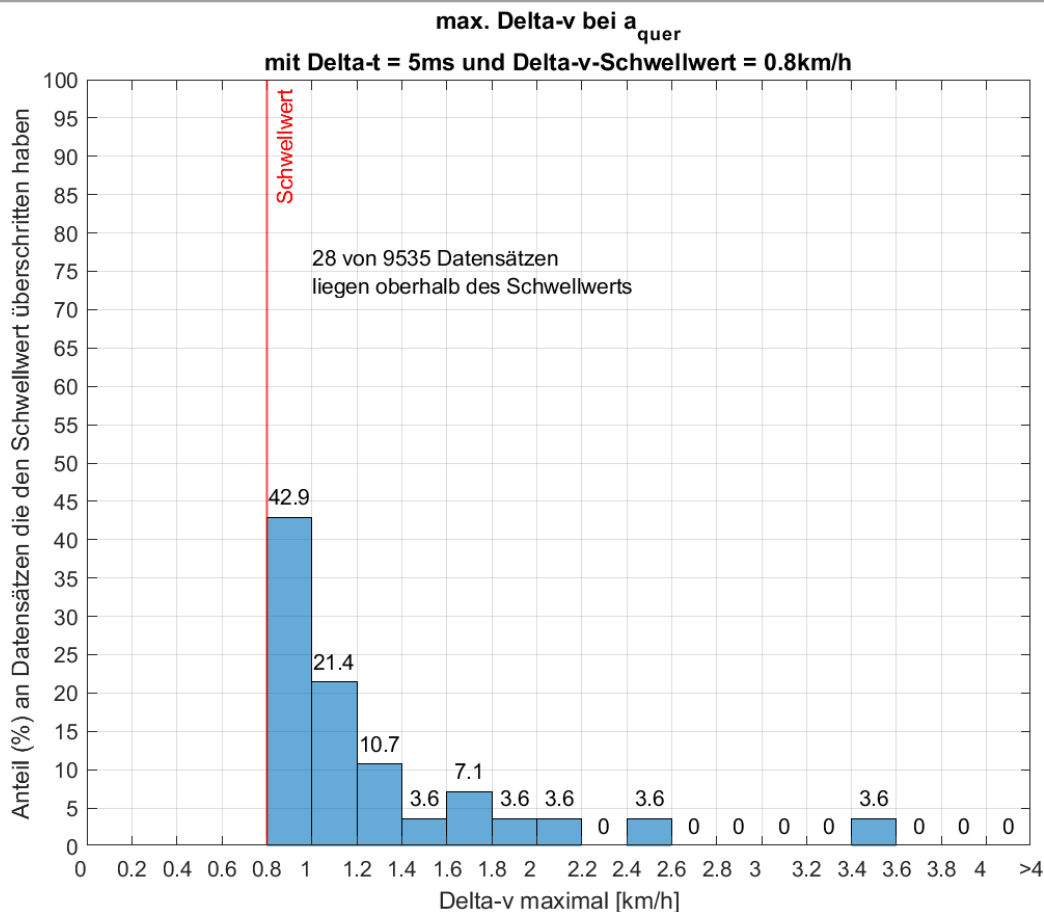


Abbildung 4.6: prozentuale Auswertung der Geschwindigkeitsänderung bei Überschreiten des Schwellwerts in Querrichtung (0,8 km/h innerhalb von 5 ms)

Auch hier ist die negative Exponentialverteilung, ähnlich der Verteilung bei der Berechnung auf Basis der Längsbeschleunigung, zu erkennen. Der Großteil der Datensätze liegt im Bereich der Geschwindigkeitsänderung zwischen 0,8 und 1,0 km/h. Dies ist aber, aufgrund der geringen Menge an Datensätzen, weniger repräsentativ als bei der Berechnung aus der Längsbeschleunigung.

Verringert man Δv um 37,5% auf 0,5 km/h kommt es annähernd zu einer Verdreifachung (2,68-fach) des Prozentsatzes der den Schwellwert erfüllenden Datensätze auf 0,78%.

Bei Auswertung der interpolierten Daten in Bezug auf eine Geschwindigkeitsänderung von 0,25 km/h steigt der Prozentsatz auf 1,77%. Dies steht in umgekehrt proportionaler Relation zu der vorhergehenden Schwellwertprüfung mit 0,5 km/h denn eine Halbierung der Geschwindigkeitsänderung führt zu einer Verdoppelung der Schwellwernerfüllung. Hier gelten die gleichen Hinweise in Bezug auf die Genauigkeit der Messdaten aufgrund der Interpolation wie bei der Längsbeschleunigung.

Die Auswertung bei einem konstantem Zeitfenster von 5 ms zeigte, dass der Schwellwert für die Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung zu hoch gewählt ist. Es sind in den 9535 Datensätzen nur 28 vorhanden, welche diesen Schwellwert überschreiten. Aus diesem Grund wurde noch eine zweite

4 Ergebnisse der Auswertung

Auswertung von Δv in Querrichtung durchgeführt. Dabei wurde der Schwellwert gleich der Geschwindigkeitsänderung und dem Zeitintervall in Längsrichtung definiert. Für die Auswertung mit einem kumulierten Δv von mehr als 0,8 km/h innerhalb von 20 ms ergibt sich dabei folgende Abbildung 4.7 (Anlage 13).

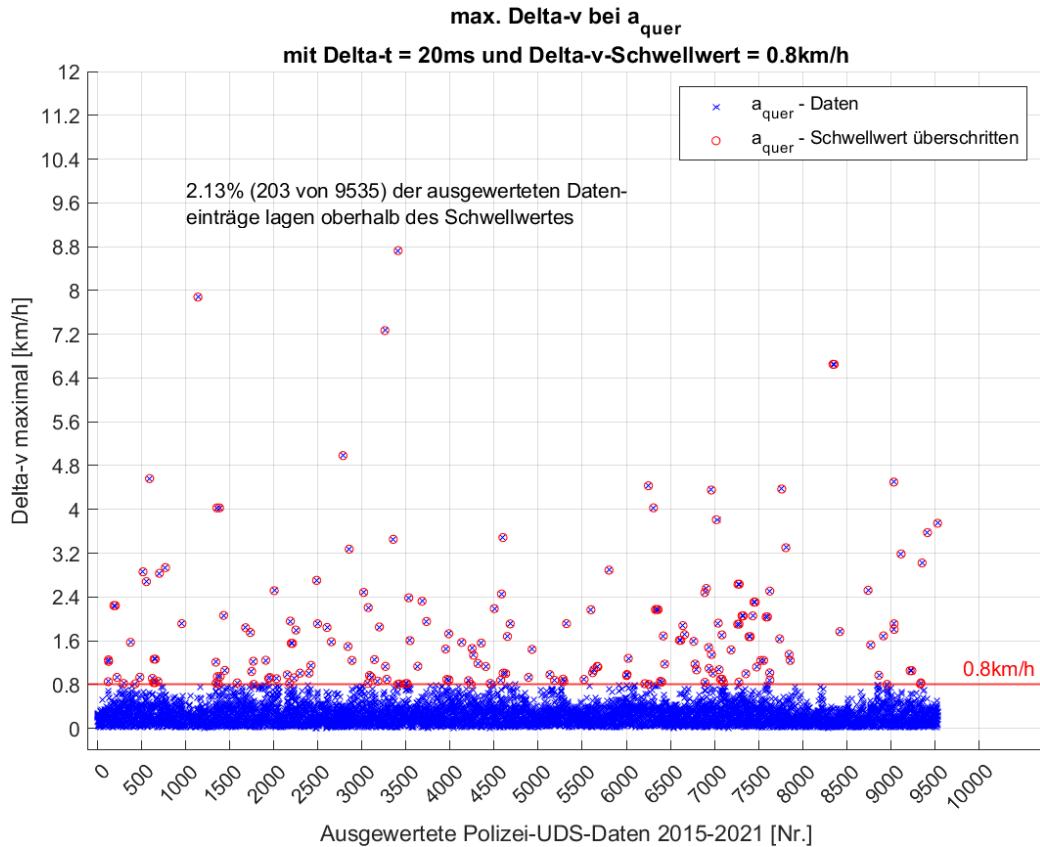


Abbildung 4.7: maximale Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)

Dabei ist zu erkennen, dass deutlich mehr Datensätze die Schwellwertprüfung erfüllen als mit einem Zeitfenster von 5 ms. Betrachtet man diese Auswertung nun anhand der statistischen Verteilung zeigt sich in Abbildung 4.8 (Anlage 25), dass dies nun ähnlich der kumulierten Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung verteilt ist. Zudem ist die negative Exponentialfunktion, die sich in diesem Histogramm darstellt, deutlich flacher als bei der vorangegangenen Auswertung mit 5 ms. Betrachtet man nun zusätzlich die Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen, welche den Schwellwert überschreiten, so zeigt sich die Ähnlichkeit zu der Auswertung der Längsbeschleunigung. Dies ist in Abbildung 4.9 (Anlage 26) dargestellt.

Durch die identische Definition des Schwellwertes für eine Speicherung in Längs- und Querrichtung ist die Definition des Schwellwertes für den Zeitpunkt Null (t_0) in der UN/ECE-Regelung kritisch zu betrachten. Bei einem Zeitintervall von 5 ms kann es zu einer verspäteten Erkennung des Ereignisses kommen. Der Einfluss auf die Speicherung im Ereignisdatenspeicher ist in einer nachfolgenden Ausarbeitung zu prüfen, da der Schwellwert in Längs- und Querrichtung in diesem Fall gleich definiert ist.

4 Ergebnisse der Auswertung

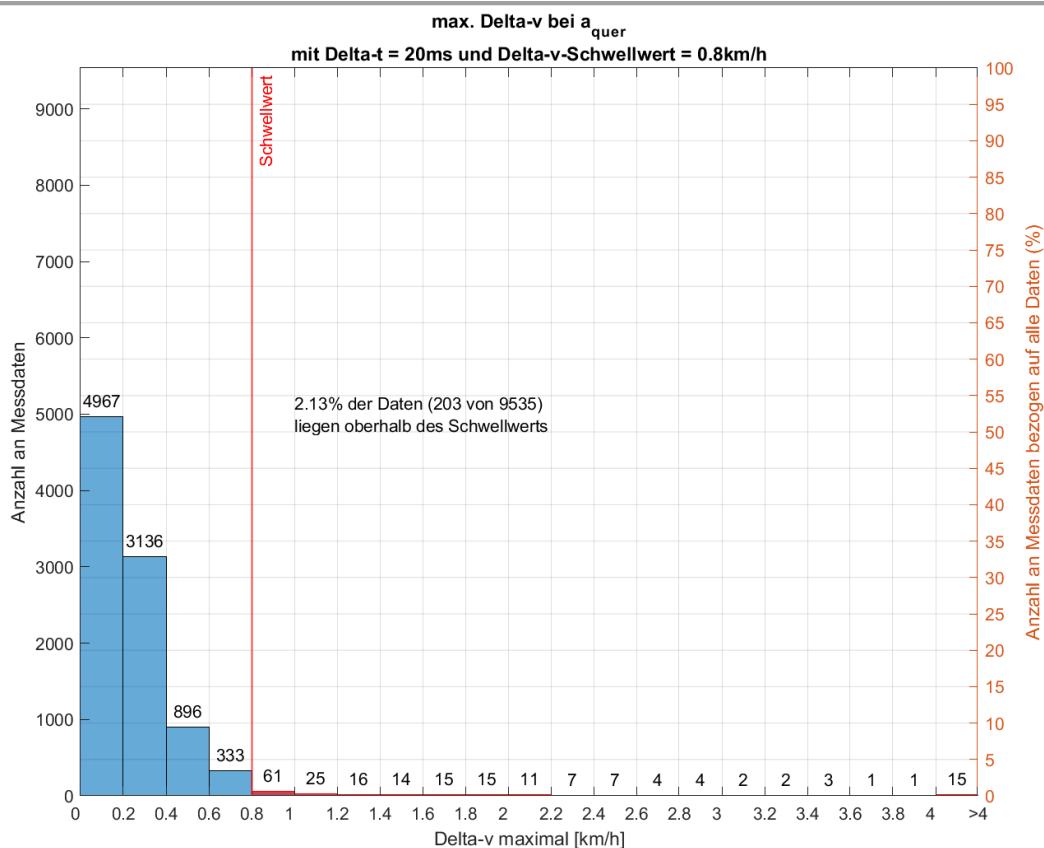


Abbildung 4.8: prozentuale Auswertung der Geschwindigkeitsänderung aller Datensätze in Querrichtung (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)

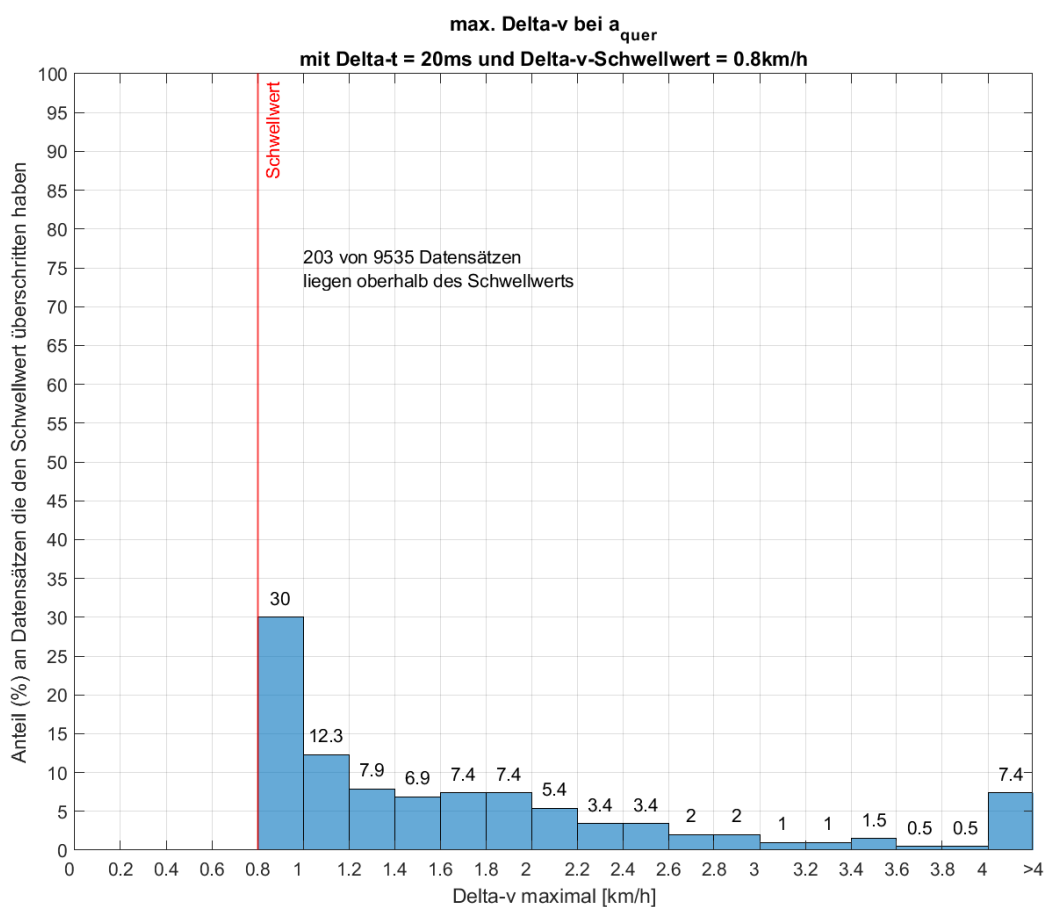


Abbildung 4.9: prozentuale Auswertung der Geschwindigkeitsänderung bei Überschreiten des Schwellwerts in Querrichtung (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)

4 Ergebnisse der Auswertung

Eine vergleichende Betrachtung der Datensätze, die in beiden Auswertungen den Schwellwert überschritten haben, kann Aufschluss darüber geben, welcher der Schwellwerte Zusammenstöße vor allem auch mit vulnerablen Verkehrsteilnehmern in Querrichtung besser abbildet. In den folgenden Auswertungen wurde sich nur auf einen identischen Schwellwert für t_0 in Längs- und Querrichtung bezogen. Die vergleichenden Abbildungen der Auswertungen der Geschwindigkeitsänderung in Richtung der Querbewegung mit einem veränderten Schwellwert aber konstanten Zeitintervall von 5 ms befinden sich ebenfalls in der Anlage 17 sowie Anlage 35.

Anschließend kann man die Längs- und Querbewegung der, den Schwellwert erfüllenden, Datensätze vergleichend gegenüberstellen.

4.1.3 Vergleich Längs- und Querbewegung

Vergleicht man die Geschwindigkeitsänderung, berechnet aus Längs- und Querbewegung, erhält man beispielsweise folgende Abbildung 4.10 für die Erfüllung der gesetzlichen Schwellwerte für t_0 . Dafür wurden die Datensätze, welche den Schwellwert in Längs- und Querrichtung erfüllen, herausgefiltert und in einer gemeinsamen Tabelle zusammengefasst. Doppelte Dateinamen, wenn in einem Datensatz die Geschwindigkeitsänderung sowohl in Richtung der Längs- als auch der Querbewegung den Schwellwert überschreitet, konnten dann mit Hilfe der unique-Funktion in Matlab substituiert werden.

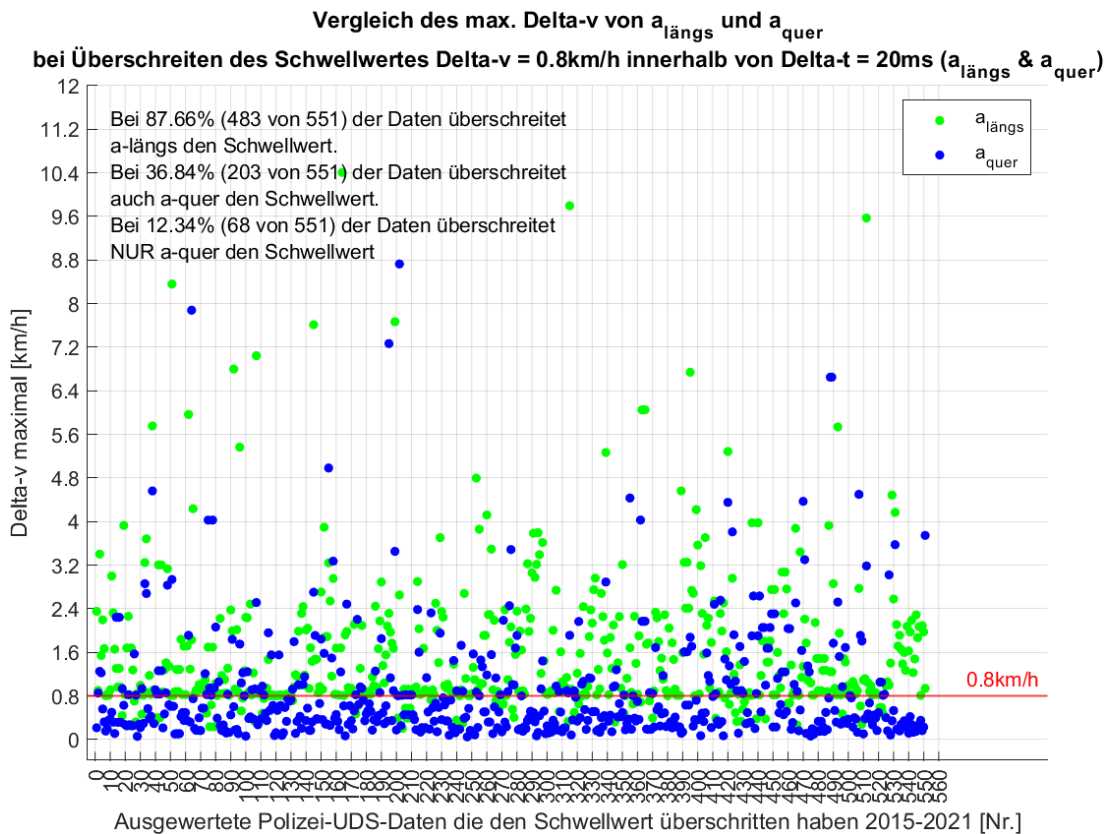


Abbildung 4.10: Vergleich der Datensätze die den Schwellwert in Längs- oder Querrichtung überschreiten (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)

4 Ergebnisse der Auswertung

In der Abbildung 4.10 oder Anlage 15 ist der Vergleich der Geschwindigkeitsänderung berechnet aus Längsbeschleunigung und der Querschleunigung für einen Delta-v Wert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms dargestellt. Dabei überschreitet in rund 87,7% der Datensätze die Geschwindigkeitsänderung aus der Längsbeschleunigung und in rund 36,8% der Datensätze die Geschwindigkeitsänderung aus der Querschleunigung den Schwellwert. In 12,3% der Fälle überschreitet nur die Geschwindigkeitsänderung aus der Querschleunigung den Schwellwert. Dies ist bei seitlichen Vollstößen und ähnlichem der Fall, wenn das Fahrzeug beispielsweise als Straßenblockade diente. Dies trat aber nur in 68 der 9535 Datensätzen auf. Bei dieser Auswertung erfüllten 551 Datensätze die Schwellwertprüfung.

Wie bereits erwähnt, sinkt die Anzahl der Datensätze, wenn man den Schwellwert und das Zeitintervall für die Geschwindigkeitsänderung in Längs- bzw. Querrichtung verringert. Bei 0,5 km/h und 10 ms in Längs- und Querrichtung sind es nur noch 363 Datensätze, siehe Anlage 29 bis Anlage 46. Mit einem Schwellwert von 0,25 km/h und 5 ms in Längs- und Querrichtung überschreiten 379 Datensätze den Schwellwert, siehe Anlage 47 bis Anlage 58. Dabei verändern sich die Prozentsätze an Datensätzen, welche den Schwellwert für Δv erfüllen, nur marginal. Der Anteil der Geschwindigkeitsänderung auf Grundlage der Längsbeschleunigung liegt in allen Auswertungen zwischen 87% und 89%. Basierend auf der Querschleunigung steigt der Anteil von zunächst rund 37% bei Verringerung des Schwellwertes und Zeitintervalls auf rund 44%. Eine Schlussfolgerung aus dieser Auswertung wäre, dass bei Verringerung der Geschwindigkeitsänderung eher Datensätze mit Geschwindigkeitsänderungen basierend auf der Längsbeschleunigung nicht mehr den Schwellwert erfüllen. Dies in Relation gesetzt zum gesetzlichen Schwellwert für t_0 , würde eine Verkürzung des Zeitintervalls und Verringerung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung erst dann einen Vorteil bringen, wenn die Datensätze, welche den Schwellwert erfüllen, in einer nächsten Ausarbeitung entanonymisiert und dann auf reale Unfälle geprüft werden. Für eine spätere Auswertung wurden die Bezeichnungen der Datensätze in Excel-Dateien abgelegt und können jederzeit vergleichend betrachtet werden. Ein kurzes Matlab-Skript zum Vergleich zweier Schwellwertprüfungen befindet sich auf dem mitgelieferten Medium.

Durch einen Vergleich der Balkendiagramme, wie in Anlage 19, sieht man den entscheidenden Einfluss des Schwellwertes in Längsrichtung auf die Anzahl an Datensätzen.

Es ist eine deutliche Tendenz von Datensätzen, welche knapp den Schwellwert überschreiten, zu erkennen. Die Anzahl nimmt exponentiell ab und nähert sich mit einzelnen Werten der maximalen Geschwindigkeitsänderung, welche in den Datensätzen berechnet wurde, an.

4 Ergebnisse der Auswertung

Vergleichend zu der Auswertung der Geschwindigkeitsänderung basierend auf Längs- und Querschleunigung, gibt es außerdem die Möglichkeit, diese zu einer resultierenden Fahrzeugbeschleunigung zusammenzufassen. Bei Fahrzeugen mit Überschlagerkennung, wie im VW Tiguan verbaut, kann man ebenfalls die Vertikalbeschleunigung mit in die Berechnung der auf das Fahrzeug wirkenden resultierenden Beschleunigung einbeziehen. Diese Berechnungen und deren Auswertung folgen im nächsten Abschnitt.

4.1.4 Auswertung der resultierenden Beschleunigung

Für die Auswertung der resultierenden Beschleunigung müssen die jeweiligen Beschleunigungen in Längs- und Querrichtung sowie optional in Vertikalrichtung zusammengefasst werden. Da es sich bei diesen Werten um vektorielle Größen handelt, wurden mit folgender Formel vektoriell addiert und die resultierende Beschleunigung berechnet [32].

$$a_{res} = \sqrt{a_x^2 + a_y^2 + a_z^2} \quad (4.1)$$

Aus dieser resultierenden Beschleunigung wird anschließend die Geschwindigkeitsänderung berechnet. Wenn man diese, ähnlich der Δv -Darstellung der Längs- oder Querschleunigung, mit einem Scatter-Plot auswertet, erhält man folgende Abbildung 4.11 oder Anlage 16. Dabei wird zunächst der gesetzliche Schwellwert einer Geschwindigkeitsänderung von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms angenommen.

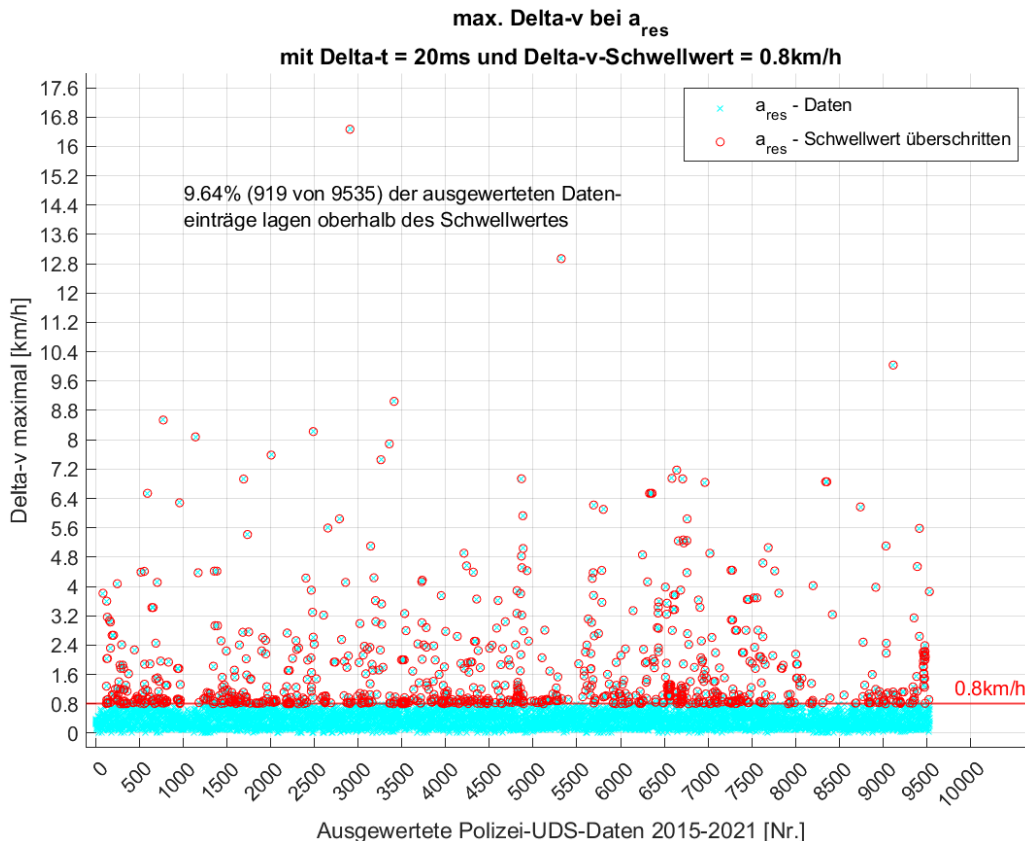


Abbildung 4.11: maximale Geschwindigkeitsänderung basierend auf der resultierenden Beschleunigung (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)

4 Ergebnisse der Auswertung

Es ist zu erkennen, dass die Anzahl der Datensätze, welche den Schwellwert erfüllen, auf insgesamt 919 von 9535 angestiegen ist. Im Ergebnis entspricht das rund 10% der Datensätze. Das liegt zum einen an der Kombination von Längs- und Querschleunigung sowie dem vorher nicht berücksichtigten Einfluss der Vertikalbeschleunigung. Vergleicht man die vorliegenden Datensätze ähnlich den vorangegangenen Auswertungen in Form eines Histogramms, erhält man daraus folgende Abbildung 4.12 (Anlage 27) und Abbildung 4.13 (Anlage 28). Dabei ist zu erkennen, dass deutlich mehr Datensätze die Schwellwertprüfung erfüllen als bei einer reinen Betrachtung der Längs- bzw. Querschleunigung. Außerdem zeigt sich in der prozentualen Auswertung der Datensätze, welche den Schwellwert überschreiten, wie in Abbildung 4.13, dass ein Anteil von 44% der Datensätze in einem Bereich zwischen 0,8 und 1,0 km/h liegen. Danach ist die Verteilung ähnlich den Auswertungen der einzelnen Beschleunigungen exponentiell fallend.

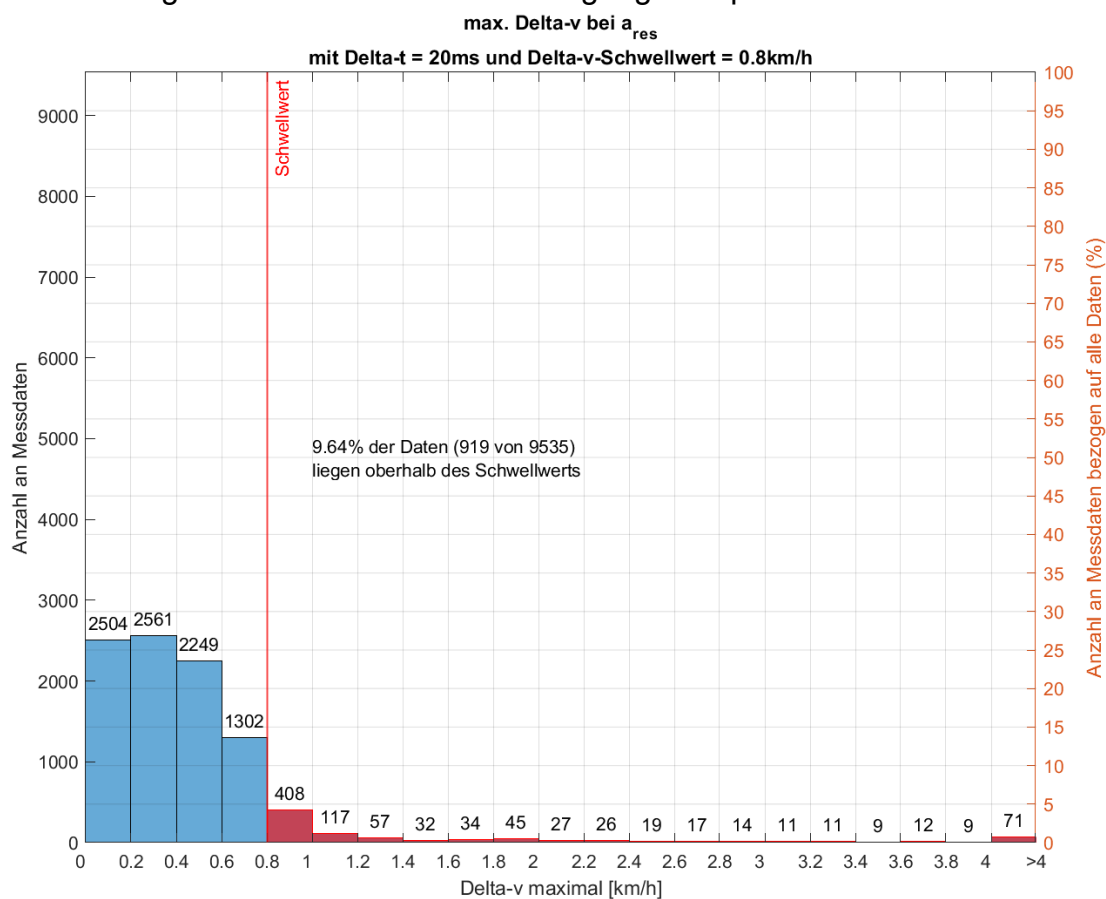


Abbildung 4.12: prozentuale Auswertung der Geschwindigkeitsänderung aller Datensätze basierend auf der resultierenden Beschleunigung (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)

4 Ergebnisse der Auswertung

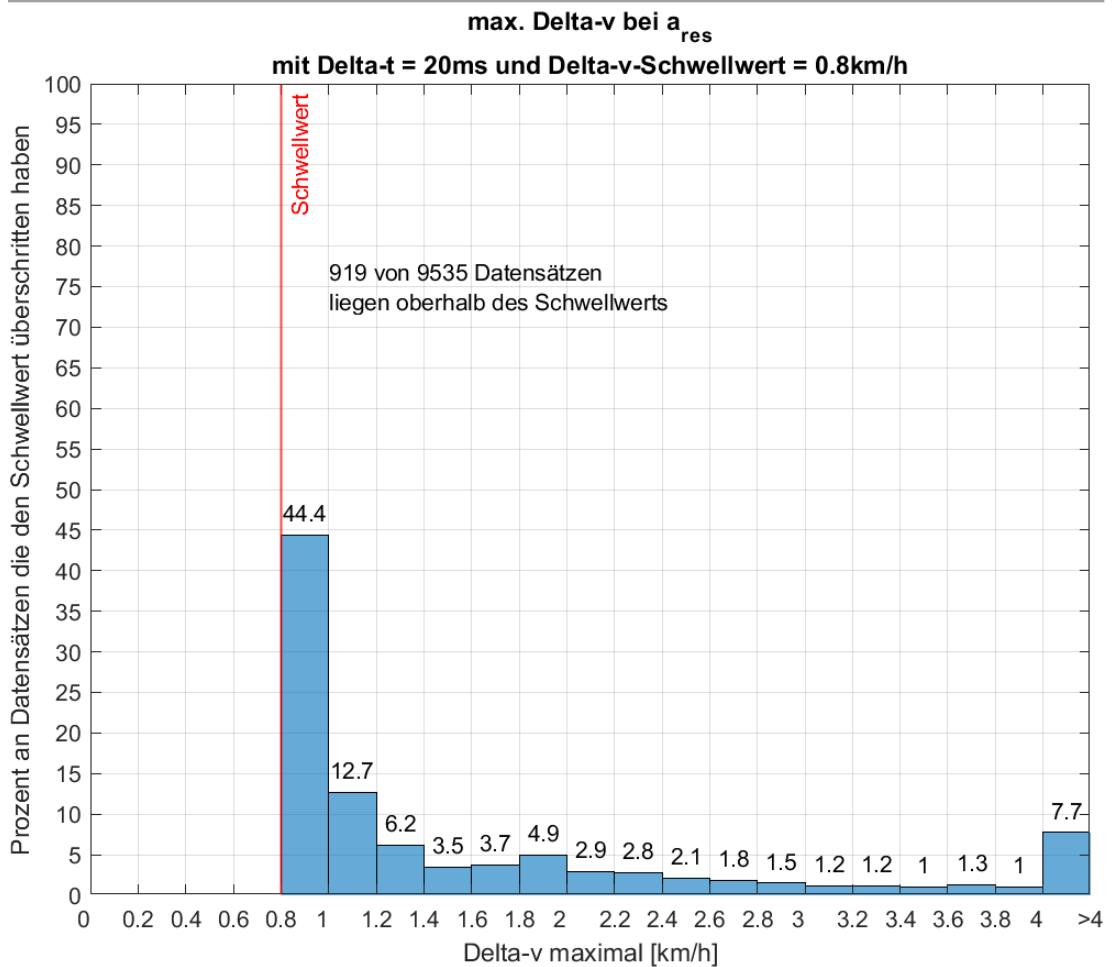


Abbildung 4.13: prozentuale Auswertung der Geschwindigkeitsänderung bei Überschreiten des Schwellwerts basierend auf der resultierenden Beschleunigung (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)

Der Vergleich legt nahe, für die resultierende Beschleunigung einen iterativen Schwellwert zu bestimmen. Dazu werden die Datensätze, die den Schwellwert in Längs- und/oder Querrichtung überschreiten, herausgefiltert. Anschließend wird die resultierende Beschleunigung und die daraus berechnete Geschwindigkeitsänderung ausgewertet. Es wird geprüft, inwiefern der Schwellwert angepasst werden müsste, um eine Speicherung in den gleichen Datensätzen auszulösen. Die Ergebnisse dieser Auswertung ist in folgender Abbildung 4.14 dargestellt.

4 Ergebnisse der Auswertung

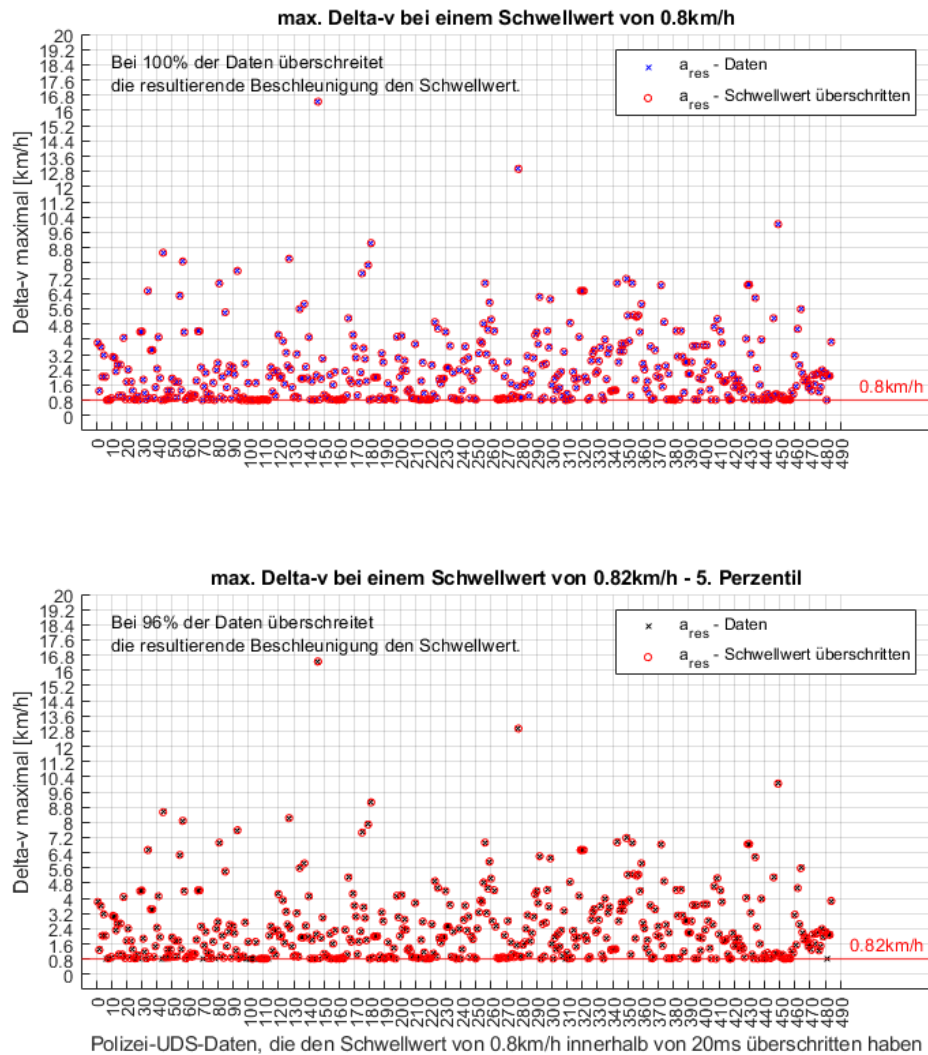


Abbildung 4.14: Iterative Schwellwertbestimmung mit Hilfe der Datensätze welche die Geschwindigkeitsänderung in Längs- oder Querrichtung von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms erfüllen

Dabei ist zu erkennen, dass es maximal einer Erhöhung des Schwellwertes für die resultierende Beschleunigung bedarf. Bereits bei einem Schwellwert der Geschwindigkeitsänderung von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms werden 100% der Datensätze gespeichert, wenn dieser Schwellwert für die Berechnung auf Basis der resultierenden Beschleunigung gilt. Eine Anpassung auf das 5. Perzentil würde einen Schwellwert von 0,82 km/h ergeben. Dieser liegt nahe am gesetzlichen Schwellwert von 0,8 km/h und es gilt deshalb in einer nachträglichen Untersuchung zu prüfen, ob die zusätzlichen Datensätze im Vergleich zu den Auswertungen der Längs- und Querbeschleunigungen kleinere Zusammenstöße sind oder nur fahrdynamische Grenzsituationen. Erst danach kann eine Aussage getroffen werden, ob der Schwellwert ebenfalls für eine berechnete resultierende Beschleunigung und der Integration in eine Geschwindigkeitsänderung berücksichtigt werden kann.

Ähnlich verhält sich die äquivalente Auswertung der resultierenden Beschleunigung bei einer Geschwindigkeitsänderung von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms. Auch hier werden bereits mit dem ursprünglichen Schwellwert 100% der Datensätze bei Berechnung aus der resultierenden Beschleunigung erfasst und würden zu einer Speicherung führen. Der Schwellwert für das 5. Perzentil würde in dem Fall bei rund 0,57 km/h liegen. Nur bei einer Verringerung der Geschwindigkeitsänderung auf 0,25 km/h verändert sich die Auswertung der resultierenden Beschleunigung. Hier erfüllen nur noch 45% der Datensätze den Schwellwert und das 5. Perzentil würde hier bei rund 0,14 km/h liegen. Vermutlich ist dies ein Einfluss der Interpolation der drei Beschleunigungssensoren auf eine Abtastrate von 1000 Hz. Dementsprechend ist, wie bereits erwähnt, diese Auswertung kritisch zu betrachten.

Neben der zusätzlichen Auswertung der resultierenden Beschleunigung kann man ebenfalls statt einer Geschwindigkeitsänderung den Ruck aus den Beschleunigungswerten berechnen und einen iterativen Schwellwert ermitteln.

4.1.5 Auswertung des Rucks

Basierend auf den Messdaten der Längs- und Querschleunigung wird zunächst der Ruck je Zeitinkrement berechnet. Da es für den Ruck keine gesetzlichen Schwellwerte in Bezug auf den Ereignisdatenspeicher gibt, wurde dieser iterativ ermittelt. Nach Rücksprache erfolgten die Berechnungen und Auswertungen in zwei Varianten. Einerseits wurde der maximale Ruck im Datensatz bestimmt und vergleichend dazu ein gleitender Mittelwert über ein 5 ms Zeitintervall gebildet. Damit sollten die durch das Sensorrauschen bedingten Schwankungen verringert werden.

Zunächst wurde der maximale Ruck jedes Datensatzes geprüft und ein Schwellwert gebildet, bei dem 5% der Ruckwerte oberhalb liegen (95. Perzentil). Der aus dieser Auswertung resultierende Schwellwert von 914 m/s^3 ist in folgender Abbildung 4.15 (Anlage 59) als rote Y-Linie hinterlegt. In einem Vergleich der Datensätze, welche den iterativen Schwellwert von aufgerundet 915 m/s^3 in Längs- bzw. Querrichtung überschreiten, wie in Anlage 60 zu sehen, zeigt sich die annähernd gleiche Verteilung in den 541 Datensätzen.

In einer zweiten Betrachtung wurde ebenfalls der Schwellwert für den maximalen Ruck ermittelt, indem man die Datensätze, welche die Schwellwertkombination für die Geschwindigkeitsänderung von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms überschritten haben, herausfiltert und den maximalen Ruck dieser Datensätze vergleicht. Dies ist in Abbildung 4.16 (Anlage 61) dargestellt. Wertet man das 5. Perzentil dieser Ruck-Werte aus, erhält man einen Schwellwert für den Ruck von rund 621 m/s^3 . Hier zeigt der Vergleich mit einem abgerundeten Wert von 620 m/s^3 wie in Anlage 62 zu sehen, dass die Anzahl der

4 Ergebnisse der Auswertung

Schwellwertüberschreitungen in Längsrichtung jetzt rund 100 Datensätze mehr als in Querrichtung umfasst.

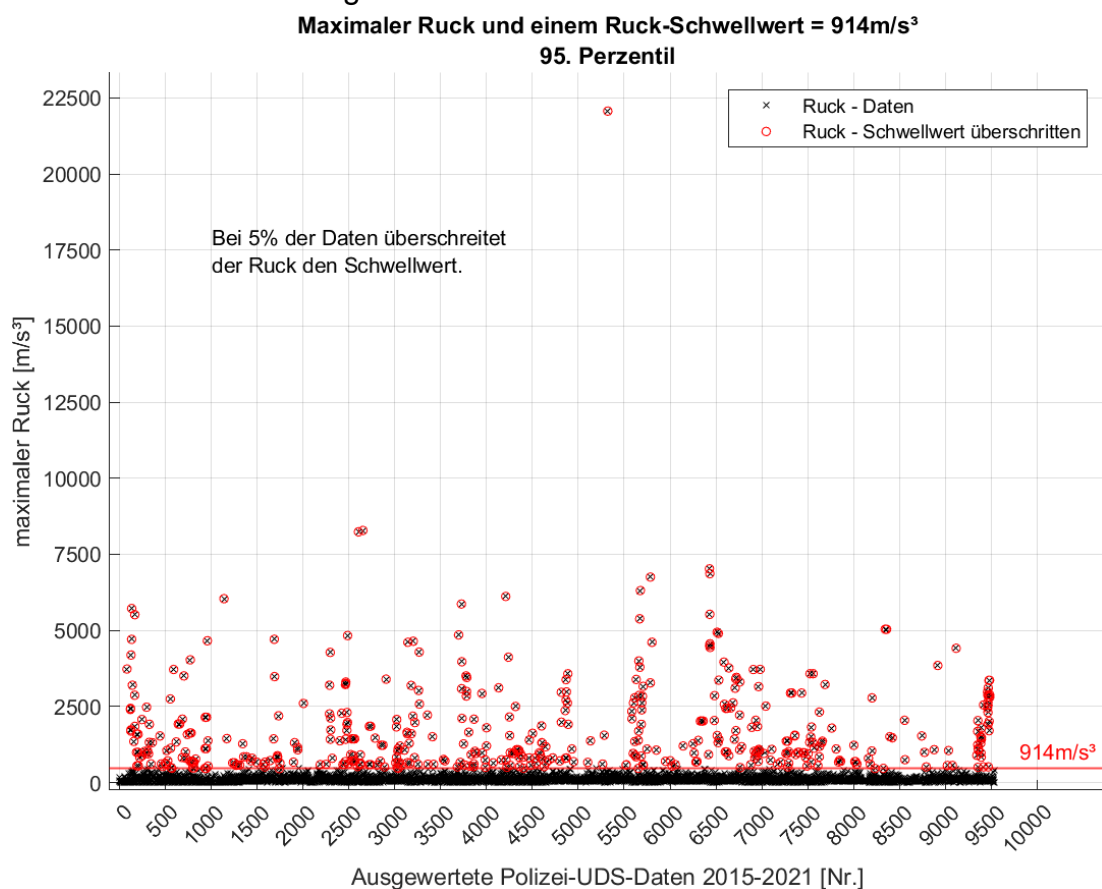


Abbildung 4.15: Maximaler Ruck innerhalb der interpolierten Messdaten der Datensätze

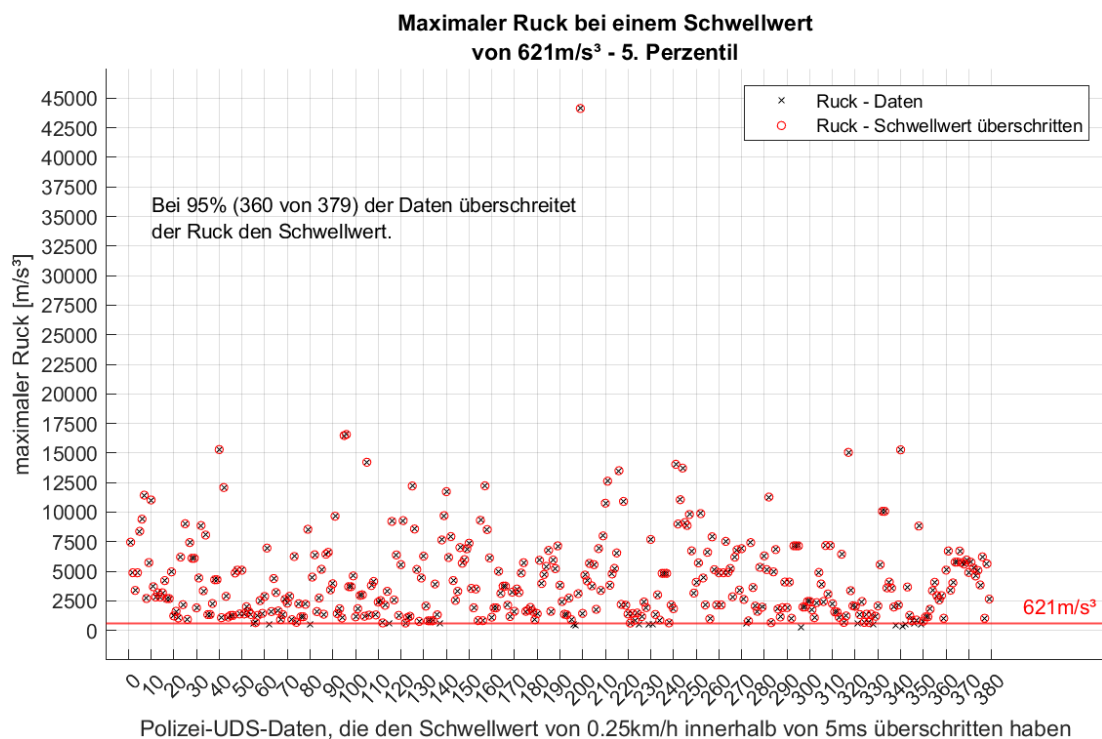


Abbildung 4.16: Iterative Schwellwertbestimmung mit Hilfe der Datensätze welche die Geschwindigkeitsänderung in Längs- oder Querrichtung von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms erfüllen

Im Gegensatz dazu fällt der iterative Schwellwert in der Auswertung des gleitenden Mittelwerts innerhalb eines Zeitfensters geringer aus. Der Schwellwert des 95. Perzentils über alle Datensätze, wie in Anlage 63 zu sehen, liegt in diesem Falle nur bei 727 m/s³. Ein Vergleich der Schwellwertüberschreitungen in Richtung der Längs- und Querschleunigung für einen gerundeten Wert von 730 m/s³ ist in Anlage 64 dargestellt. In der Auswertung der Datensätze, welche den Schwellwert für die Geschwindigkeitsänderung von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms erfüllen, liegt das 5. Perzentil bei 561 m/s³ (siehe Anlage 65).

Dabei ist festzustellen, dass beispielsweise mit einem gerundeten Ruck-Schwellwert von 560 m/s³ deutlich mehr Datensätze eine Triggerung auslösen würden als mit dem gesetzlichen Schwellwert für die Geschwindigkeitsänderung zum Zeitpunkt t_0 . In Längsrichtung sind es 645 von 9535 (6,76%) Datensätzen, die den Schwellwert für den Ruck überschreiten. In Querrichtung sind es nur geringfügig weniger mit 520 Datensätzen (5,45%). Entscheidend hierbei ist aber der Vergleich der Datensätze, welche den Schwellwert überschreiten. Dies ist in Anlage 66 dargestellt. Im Resultat sind es dann nur noch 737 von 9535 (~8%) der Datensätze der Auswertung. Dies liegt wiederum genau im erwarteten Bereich der Anzahl an realen Unfällen.

Die Ähnlichkeit der iterativen Schwellwerte deutet auf eine mögliche Schwellwertkombination für den Ruck zum Zeitpunkt t_0 hin. Es gilt also in einer nachfolgenden Ausarbeitung zu prüfen, welche Ruckwerte bei dynamischen Fahrweisen und Notbremsungen auftreten können. Nimmt man beispielsweise die maximale Vollverzögerung eines Sportwagens mit 11,35 m/s² an, welche innerhalb einer Bremsschwellzeit von 0,2 s erreicht wird, entspricht das einem mittleren Ruck von rund 57 m/s³. Aufgrund der höheren Abstrakte und dem damit verbundenen Sensorrauschen der Beschleunigungssensoren kann es in den Messdaten aber zu deutlich höheren berechneten Ruck-Werten kommen. Dies gilt es ferner experimentell zu prüfen. Nach Rücksprache können im alltäglichen Straßenverkehr und fahrdynamischen Grenzsituationen Ruckwerte zwischen 500 und 2000 m/s³ erreicht werden. Aus diesem Grund wurden die Namen der Datensätze, welche innerhalb dieses Bereiches liegen in einer separaten Excel-Tabelle abgelegt und können für die weitere Verarbeitung und Prüfung auf tatsächliche Anstöße genutzt und ausgewertet werden [11, S. 477].

Beispielhaft ist hier ebenfalls der seitliche Ruck-Schwellwert aus der UN/ECE-Regelung 79 für die Genehmigung von Lenkanlagen zu nennen. Dieser darf über einen Zeitraum von 0,5 s bei Eingriff eines automatisierten Lenksystems nicht größer als 5 m/s³ sein [33].

4.2 Crash-Versuche - VW Tiguan gegen Biofidel-Dummy

Zusätzlich zu den rund 9600 Datensätzen der Polizei wurden von Priester und Weyde in Zusammenarbeit mit der TU Berlin und für Forschungszwecke der Bundesanstalt für Straßenwesen mehrere Versuche mit einem VW Tiguan durchgeführt. Das Fahrzeug wurde dafür mit verschiedenster Messtechnik ausgestattet, um die auf das Fahrzeug wirkenden Beschleunigungen bei einem Anstoß an unterschiedlichen Messpunkten im Fahrzeug zu erfassen. Dabei wurden verschiedene Frontal-Crash-Situationen mit dem Biofidel-Dummy nachgestellt. Die Kollisionsgeschwindigkeit wurde variiert und im Anschluss eines jeden Versuchs wurden die Messdaten der Messsysteme gespeichert und in den eingangs genannten Dateiformaten abgelegt. Eine Übersicht über die Art und Lage der Messsysteme ist in folgender Abbildung 4.17 dargestellt.

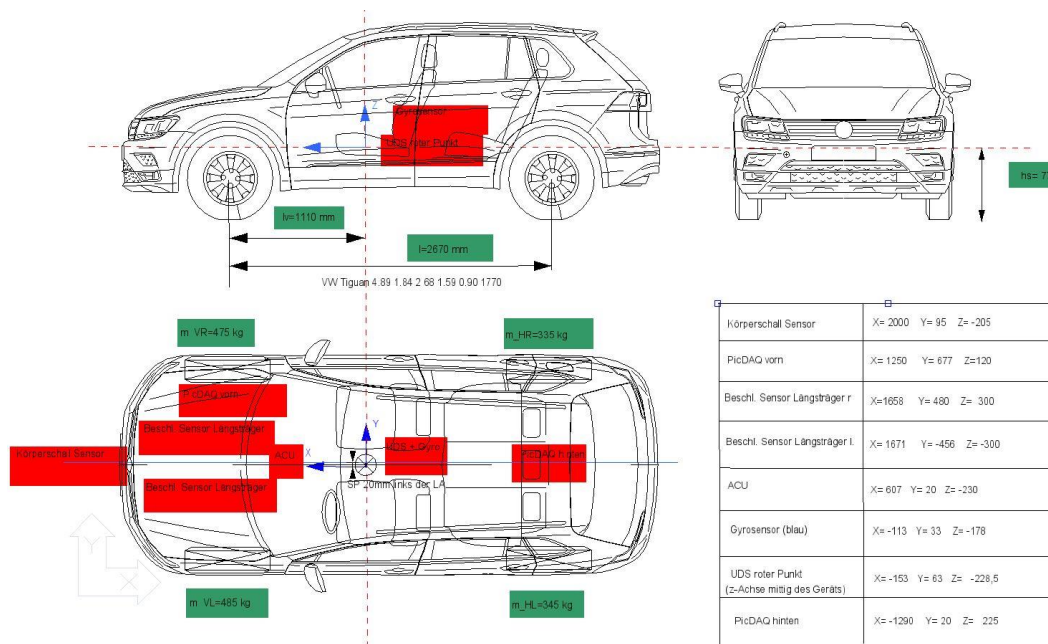


Abbildung 4.17: Lage und Abstand der Messsysteme vom Fahrzeugschwerpunkt

Aufgrund der geringeren Anzahl an Versuchen und zum Vergleich der einzelnen Messsysteme erfolgt für diese Daten nur die Betrachtung der Geschwindigkeitsänderung basierend auf der Längs- bzw. Querbeschleunigung.

Bei der Auswertung fiel im Vorfeld auf, dass der PicDAQ 4 (blau) sowohl in manchen Versuchen mit dem Biofidel-Dummy als auch in den StreetProbe-Versuchen mit dem Sensor am Airbag Control Module (ACM) den Schwellwert sowohl in x- als auch in y-Richtung überschreitet. Nach Prüfung der Messdaten kommt es hier zu unterschiedlichen Sprüngen innerhalb der Datenaufzeichnung. Dies konnte durch die Applikation während der Stapelverarbeitung bislang nicht kompensiert werden. Mehrere Lösungsansätze für eine Korrektur wurden in Matlab variiert. Dadurch, dass es sich nicht um einen Sprung

4 Ergebnisse der Auswertung

innerhalb eines Zeitinkrements handelt, sondern das Fenster des Sprungs bis zu 100 Messwerte lang ist, konnten die Daten nicht adäquat korrigiert werden. Einzig die Anpassung aller „Ausreißer“ (engl. „Outliers“) auf den Median des Beschleunigungssignals ermöglichte eine entsprechende Verarbeitung der Daten. Dies wurde mit Hilfe der filloutliers-Funktion in Matlab realisiert. Da in diesem Falle aber das Sensorrauschen und die Spitzen eliminiert werden, wurde eine zusätzliche Checkbox im Optionen-Tab implementiert, welche dem Benutzer die Möglichkeit bietet, diesen Berechnungsschritt zu deaktivieren. Standardmäßig ist die Option eingeschaltet. Dabei ist aber ebenfalls zu sehen, dass nach dem Sprung in der Regel auch das Sensorrauschen signifikant geringer ist als vor dem Sprung. Die Verwendbarkeit der Messdaten ist also zu hinterfragen. Ein Beispiel für die Korrektur des Signals ist in folgender Abbildung 4.18 dargestellt.

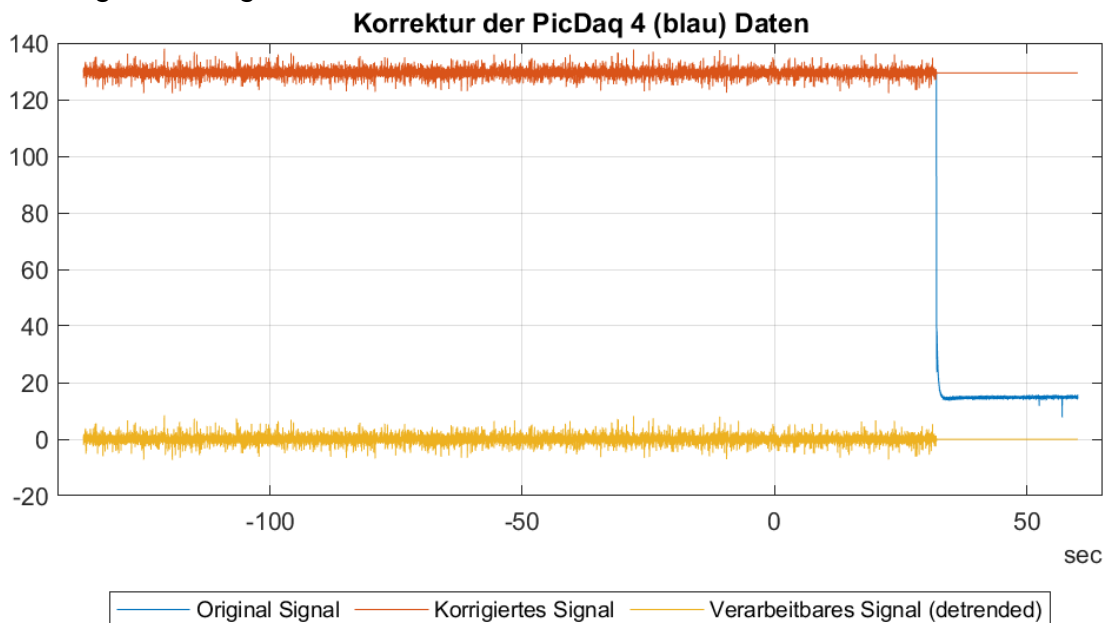
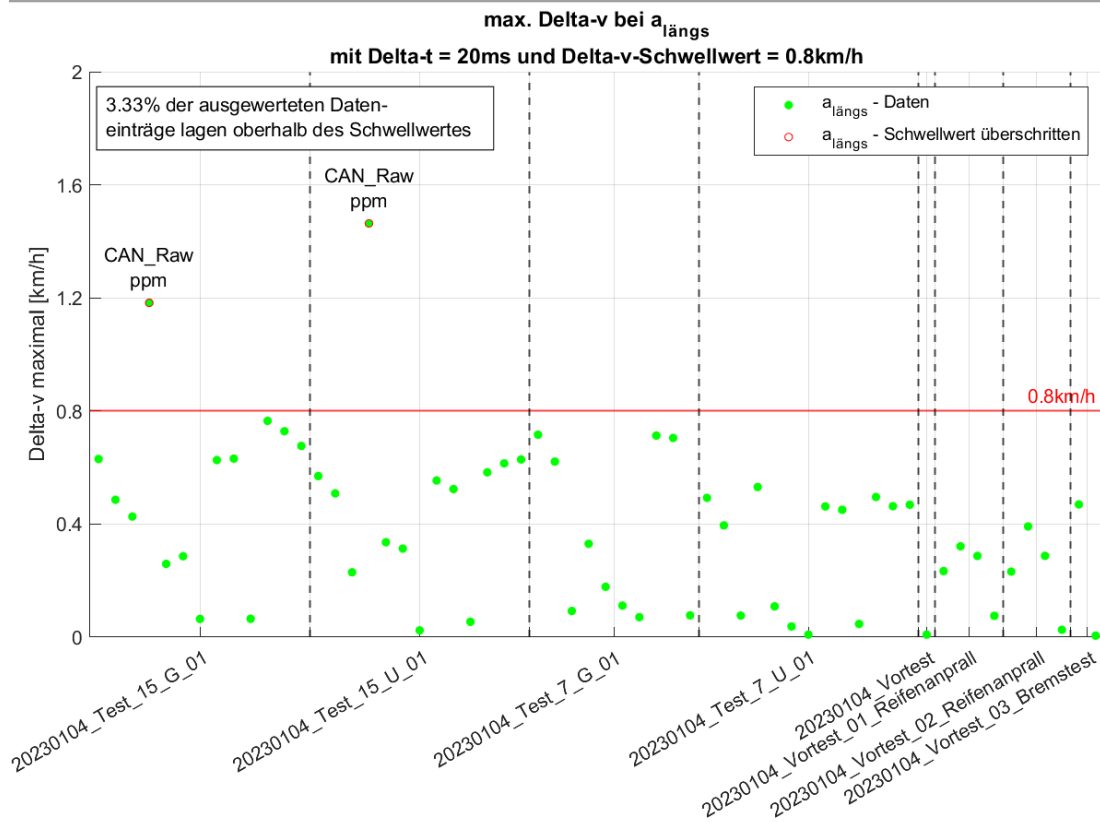


Abbildung 4.18: Beispiel korrigierter PicDAQ 4 (blau) Daten

Die Auswertung aller korrigierten Daten ergab für alle Beschleunigungen in Längsrichtung zusammengefasst die Abbildung in Anlage 67.

Wertet man die einzelnen Tage aus, verbessert sich die Übersichtlichkeit der Abbildung. Dabei steht jeder Messpunkt für ein Beschleunigungssignal in Längsrichtung und bei Überschreiten des Schwellwertes für t_0 wird zusätzlich das Messsystem sowie die Bezeichnung des Beschleunigungssignals angegeben. Die folgende Abbildung 4.19 (Anlage 68) zeigt eine Darstellung ähnlich der Auswertung der Datensätze der Polizei Berlin. Für die Verbesserung der Darstellung wurden alle Signale in Längsrichtung des jeweiligen Versuchs unter dieser Bezeichnung zusammengefasst und die einzelnen Versuche mit gestrichelten Linien getrennt.

4 Ergebnisse der Auswertung



Ausgewertete Versuchs-Daten aus den Versuchen VW Tiguan - Biofidel-Dummy

Abbildung 4.19: Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung der Versuche an Tag 1 (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)

Am ersten Tag wurden verschiedene Tests bei Geschwindigkeiten von 7 und 15 km/h, sowie mehrere Vortests durchgeführt. Die Auswertung zeigt, dass der mittige Pedestrian Protection Sensor (PPM) des ACM als einziger den Schwellwert für t_0 überschreitet. Dabei handelt es sich um einen Pedestrian Protection Sensor der mittig hinter dem Stoßfänger verbaut ist und für die Auslösung von Schutzeinrichtungen für vulnerable Verkehrsteilnehmer genutzt wird. Dabei ist zu erkennen, dass dieser Sensor erst bei Geschwindigkeiten von 15 km/h am ersten Tag den Schwellwert für den Zeitpunkt des Ereignisses überschreitet.

4 Ergebnisse der Auswertung

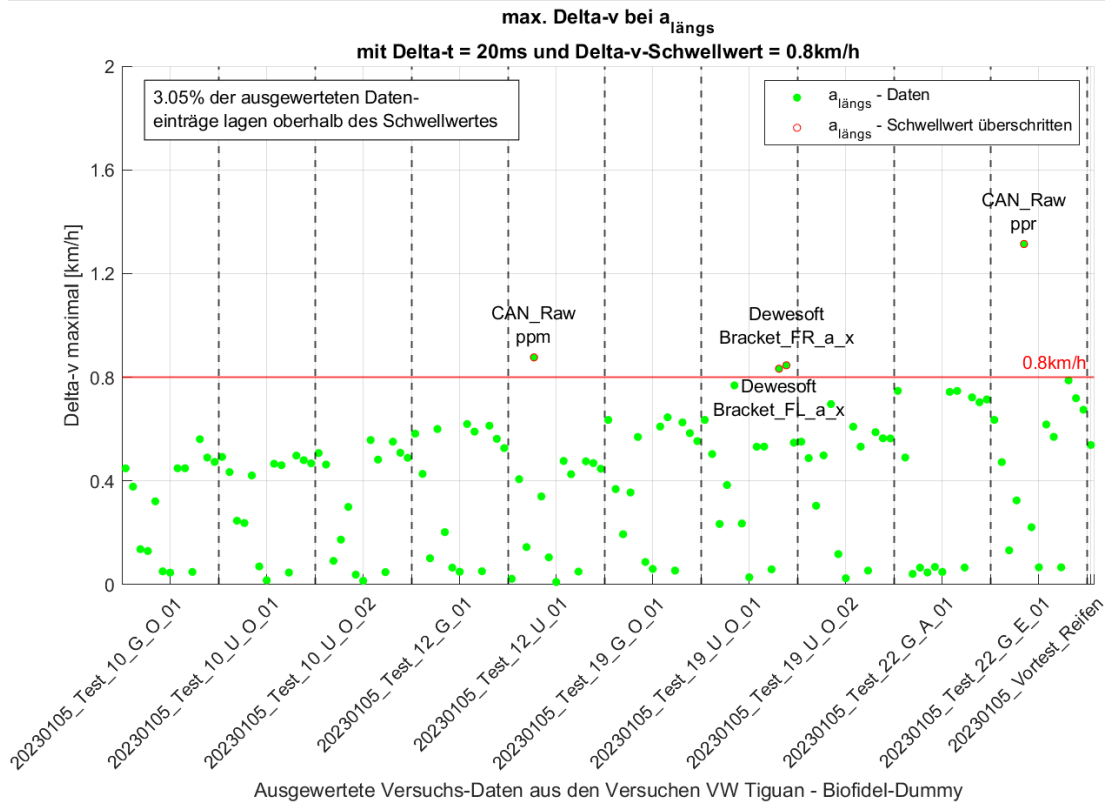


Abbildung 4.20: Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung der Versuche an Tag 2 (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)

Am zweiten Tag wurden die Geschwindigkeiten weiter variiert und lagen bei 10, 12, 19 und 22 km/h. Die Darstellung der Schwellwert-Prüfung dieses Tages ist in Abbildung 4.20 (Anlage 69) zu sehen. Hier ist eindeutig zu erkennen, dass der PPM-Sensor des ACM bei einer ähnlichen Geschwindigkeit, wie am ersten Tag, oberhalb des Schwellwertes liegt. Zusätzlich dazu überschreitet der Dewesoft-Sensor am vorderen linken und rechten Fronträger den Schwellwert knapp beim Versuch 19-UO-01. Dabei ist zu beachten, dass es aufgrund der Lage dieser Sensoren mit einem Hebelarm zum Fahrzeugschwerpunkt zu einer möglichen Überlagerung mit der Erdbeschleunigung beim Nicken des Fahrzeugs gekommen sein kann. Wurde dies nicht durch die Software des Messgeräte-Herstellers kompensiert, kann dies ein Grund für die Überschreitung bei diesem Versuch sein.

4 Ergebnisse der Auswertung

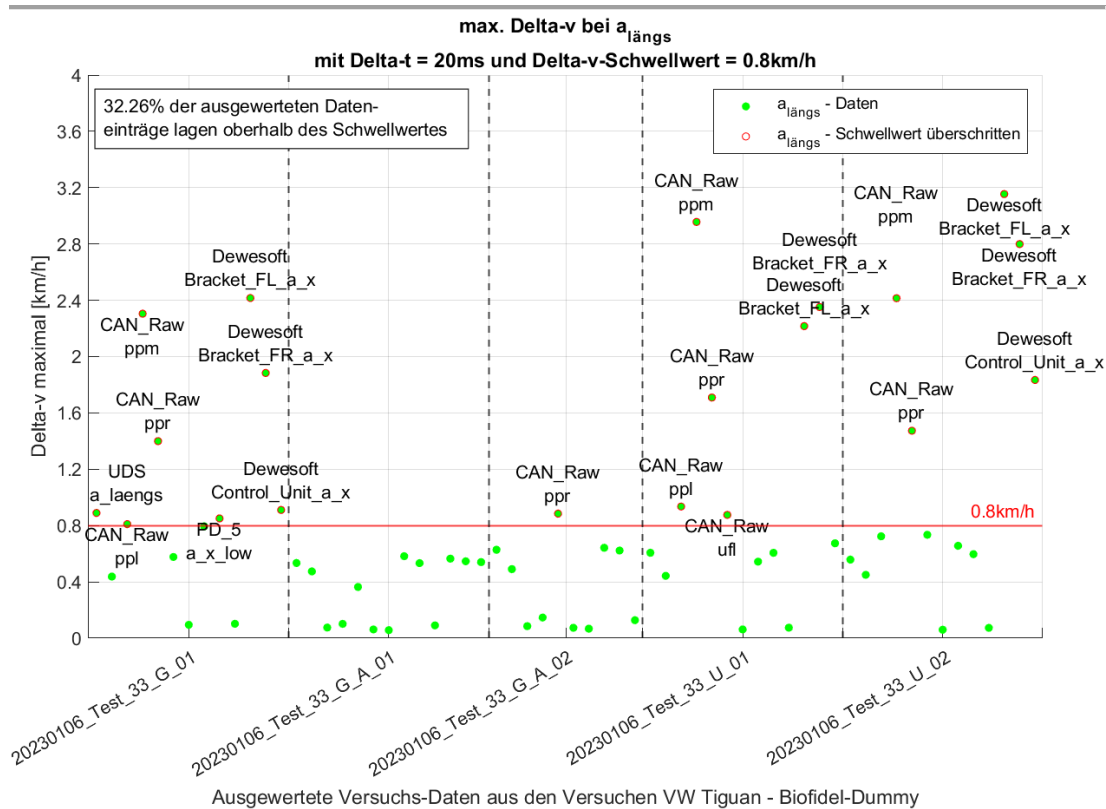


Abbildung 4.21: Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung der Versuche an Tag 3 (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)

Wie in Abbildung 4.21 (Anlage 70) zu sehen ist, wurden die Geschwindigkeiten am dritten Tag deutlich erhöht und liegen mit 33 km/h beispielsweise im Durchschnitt der Geschwindigkeit, die 2018 in Dresden im alltäglichen Straßenverkehr ermittelt wurde [4]. Diese Versuche bilden also das durchschnittliche Szenario des Fußgänger-Unfalls im innerstädtischen Bereich ab. Hier ist deutlich zu erkennen, dass die Pedestrian Protection-Sensoren des TEDR, welche in der Frontschürze verbaut sind, sowie die Beschleunigungssensoren des Dewesoft-Systems an den Fronträgern, in den meisten Versuchen zu einer sicheren Erfüllung des gesetzlichen Schwellwertes für t_0 führen. Zusätzlich ist zu erwähnen, dass im Test 33-G-01 auch die Geschwindigkeitsänderung basierend auf der Längsbeschleunigung des Unfalldatenspeichers ausgereicht hat, um den Schwellwert zu überschreiten.

Vergleichend zu den Geschwindigkeitsänderungen auf Basis der Längsbeschleunigung muss auch die Querschleunigung integriert und betrachtet werden. Der gesetzliche Schwellwert für t_0 sieht hier ein geringeres Zeitintervall vor. Innerhalb von 5 ms ergeben sich für die Beschleunigungsmessdaten in Querrichtung durch Integration die Geschwindigkeitsänderungen wie sie zusammengefasst in Anlage 72 bis Anlage 75 zu sehen sind. Dabei ist zu erkennen, dass es am ersten und zweiten Tag zu keiner Überschreitung des Schwellwertes in Querrichtung kommt. Bei einer Auswertung des Schwellwertes bei gleichem Zeitintervall wie in Längsrichtung kommt es jedoch zu ähnlichen Überschreitungen wie bei der Auswertung von Δv basierend auf der

4 Ergebnisse der Auswertung

Längsbeschleunigung. Aus diesem Grund basieren die nachfolgenden Betrachtungen auf einem gleichen Schwellwert in Längs- und Querrichtung. Eine zusammenfassende Übersicht aller Versuche und deren Geschwindigkeitsänderungen in Querrichtung innerhalb von 20 ms ist in der Abbildung in Anlage 77 dargestellt.

Auch hier ist es von Vorteil, die einzelnen Versuchs-Tage separat zu betrachten. Die Geschwindigkeitsänderung aller Beschleunigungssignale in Querrichtung für den ersten Tag ist in folgender Abbildung 4.22 (Anlage 78) zu sehen.

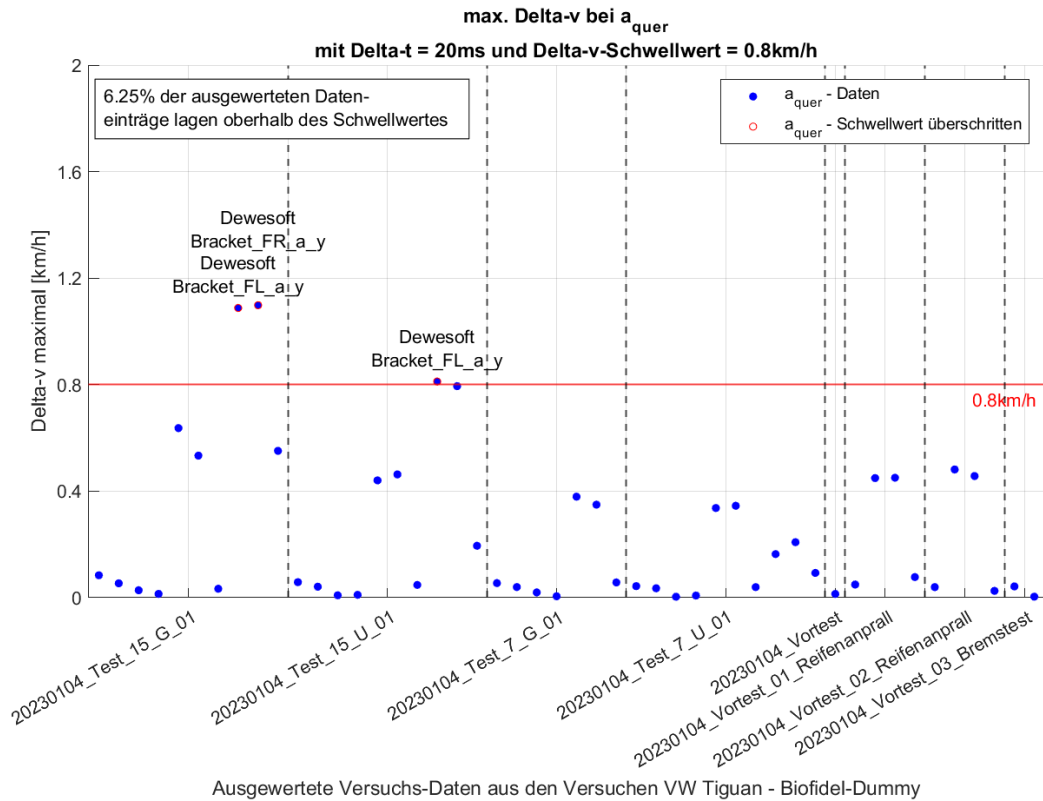


Abbildung 4.22: Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung der Versuche an Tag 1 (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)

Bereits am ersten Tag der Versuche ist die Ähnlichkeit zu der Auswertung der Längsbeschleunigung mit gleichem Schwellwert zu erkennen. Auch in Querrichtung überschreiten die ersten Sensoren bei einer Kollisionsgeschwindigkeit von 15 km/h die Geschwindigkeitsänderung von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms.

4 Ergebnisse der Auswertung

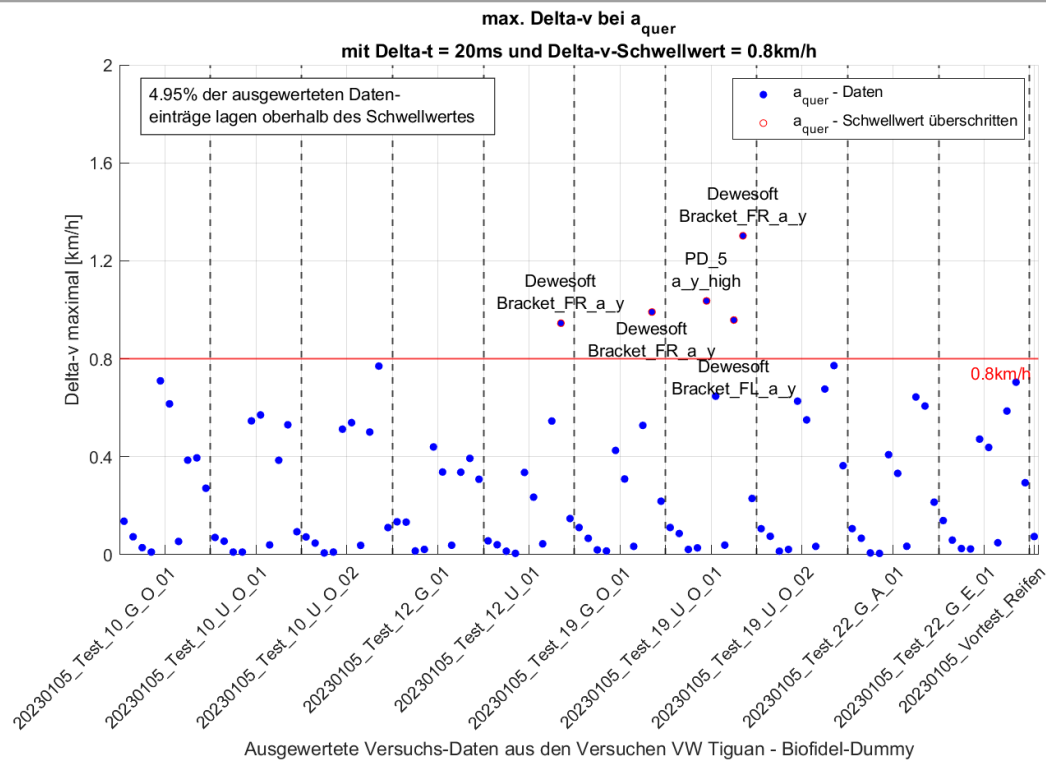


Abbildung 4.23: Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung der Versuche an Tag 2 (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)

Auch am zweiten Tag, wie in Abbildung 4.23 (Anlage 79) zu erkennen, ist die Auswertung ähnlich der Längsbeschleunigung. Hier Lösen vor allem die Dewesoft-Sensoren an den Fronträgern bei einer Geschwindigkeit von 19 km/h aus.

Betrachtet man vergleichend dazu die Auswertung in Querrichtung bei konstantem Zeitintervall von 5 ms, so zeigt sich, dass es an den ersten beiden Tagen zu keiner Überschreitung des Schwellwertes kommt. Bei den Versuchen mit dem Biofidel-Dummy kommt es, bei einem Zeitintervall von 5 ms, bis zu einer Kollisionsgeschwindigkeit von 22 km/h zu keiner Auslösung des Schwellwertes für t_0 . Dies unterstützt die naheliegende Betrachtung des identischen Schwellwertes für die Geschwindigkeitsänderung basierend auf der Längs- und Querbeschleunigung.

4 Ergebnisse der Auswertung

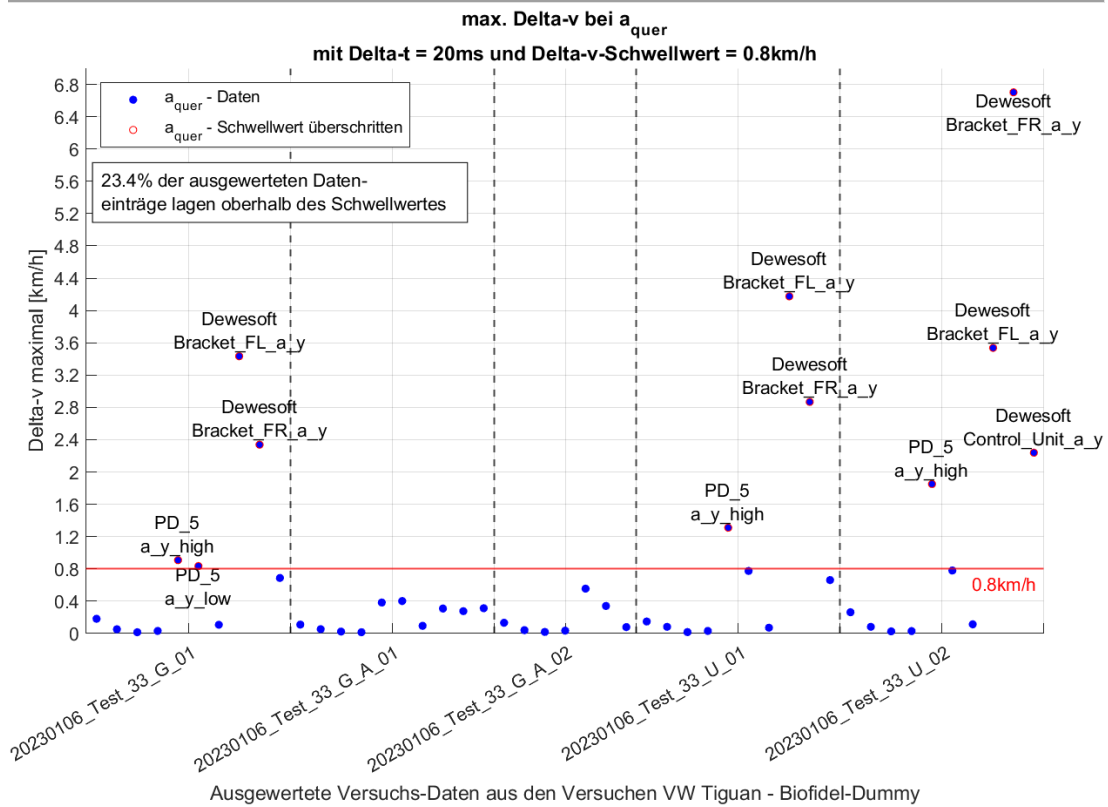


Abbildung 4.24: Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung der Versuche an Tag 3 (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)

Am dritten Tag kommt es durch die höhere Geschwindigkeit von 33 km/h auch zu häufigeren Überschreitungen des Schwellwertes in Querrichtung. Dies ist in Abbildung 4.24 (Anlage 80) zu sehen. Dabei überschreiten, ähnlich dem zweiten Tag, vorrangig die Dewesoft-Sensoren an den Fronträgern, sowie einmal der Sensor des Steuergeräts den Schwellwert in Querrichtung. Außerdem ist bei einem Vergleich mit dem verringertem Zeitintervall (5 ms) zu erkennen, dass in dem Falle die Querbeschleunigungen des PicDAQ 5 nicht den Schwellwert überschreiten. Auch hier muss ein Einfluss des Wankens und Nickens bei Kollision mit dem Dummy auf das Sensor-Signal geprüft werden. Ein Ansatz dieser Fehlerbetrachtung wurde bereits in der Master-Thesis von Graßl behandelt [32, 34].

Die Auswertungen der anderen Schwellwertkombinationen sind in Anlage 82 bis Anlage 106 zu sehen. Bei einer Geschwindigkeitsänderung von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms führt dies zu keiner wesentlichen Veränderung. Bei einer Verringerung des Schwellwertes auf 0,25 km/h innerhalb von 5 ms führen die meisten Sensoren ab 12 km/h zu einer Schwellwertüberschreitung.

Neben den Versuchen mit dem Biofidel-Dummy wurden zusätzlich noch vier Messfahrten mit einem Teil der Messtechnik im Straßenverkehr durchgeführt.

4.3 Auswertung der StreetProbe-Daten

Abschließend wurden mit dem zuvor erwähnten Messfahrzeug VW Tiuan noch vier Versuche im Straßenverkehr in Berlin durchgeführt. Dabei wurden erneut die Zeitreihen der noch zusätzlich verbauten Beschleunigungssensoren aufgezeichnet. Die Messtechnik bei diesen Versuchen umfasste die beiden PicDAQ-Systeme, das Dewesoft-System sowie die aufgezeichneten Daten aus dem Fahrzeug-CAN.

Betrachtet man die Daten aus den vier Versuchen und vergleicht die Geschwindigkeitsänderungen der von den verschiedenen Messsystemen aufgenommenen Beschleunigungssignale in Längsrichtung, kann man alle Signale in einer Abbildung 4.25 oder Anlage 107 zusammenfassen.

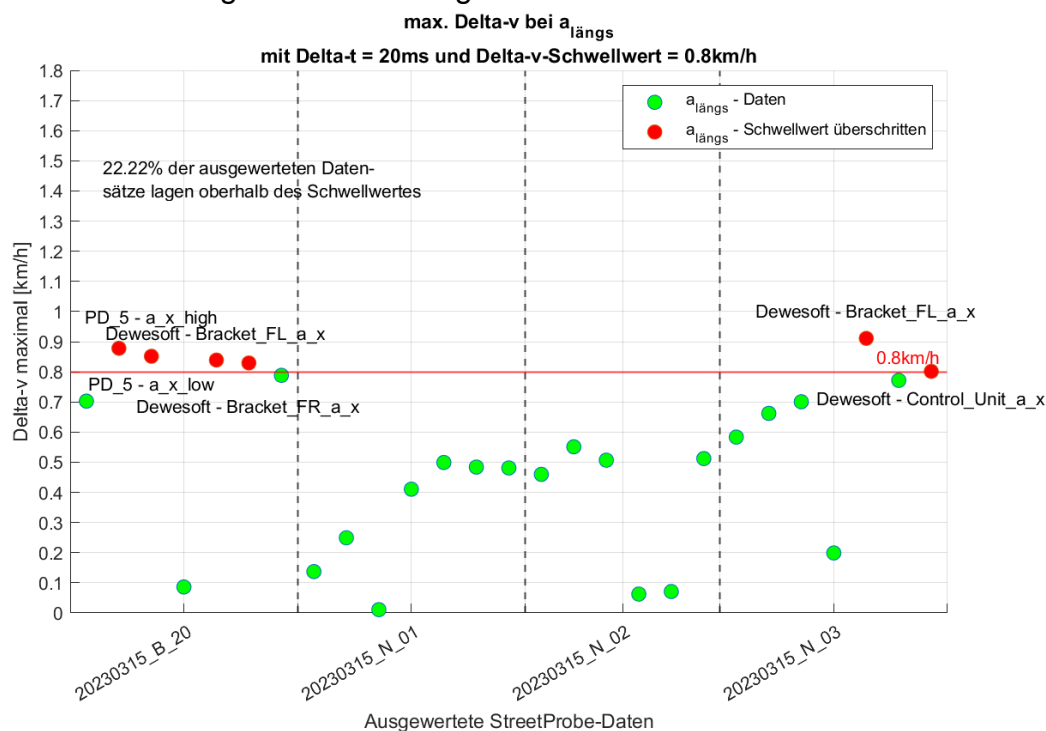


Abbildung 4.25: Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung der StreetProbe-Versuche (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)

Bei dem ersten zusammengefassten Versuch handelt es sich um die Berechnung der Geschwindigkeitsänderung aller Beschleunigungswerte in x-Richtung bei den drei Bremsversuchen. Es ist zu erkennen, dass die Geschwindigkeitsänderungen auf Basis der Beschleunigungssignale des PicDAQ 5, welcher am vorderen rechten Längsträger montiert wurde, knapp oberhalb des Schwellwertes liegen. Die Messdaten der Sensoren wurden gefiltert und mit Hilfe der detrend-Funktion in Matlab genullt. Aus diesem Grund ist es möglich, dass diese Überschreitung in der Nähe des Längsträgers auf eine nicht kompensierte Beschleunigungsverstärkung durch das Nicken des Fahrzeugs entstanden ist. Bei einem Nicken des Fahrzeugs in Richtung der Fahrzeugfront geht die Erdbeschleunigung in Verbindung mit dem Hebelarm zum Schwerpunkt des Fahrzeugs in den Messwert des

4 Ergebnisse der Auswertung

Beschleunigungssensors mit ein. Dies könnte mit Hilfe eines Gyro-Sensors und der Bestimmung der Winkelbeschleunigung kompensiert werden. Ein ähnlicher Fehler könnte bei dem Beschleunigungssensor des Dewesoft-Systems am vorderen linken Träger zu einem Überschreiten des Schwellwerts bei dem Versuch „B20“ geführt haben. Da diese Sensoren direkt am Längsträger kurz vor dem Stoßfänger montiert wurden, spielt auch hier der Hebelarm zum Schwerpunkt des Fahrzeugs und die Überlagerung mit der Erdbeschleunigung eine wichtige Rolle. Das Überschreiten der Geschwindigkeitsänderung dieses Sensors ist aber nur marginal und könnte im Falle der Bremsung auch durchaus die Schwelle für den Zeitpunkt t_0 erreichen. Ob eine Speicherung im Ereignisdatenspeicher erfolgt, hängt in dem Fall davon ab, ob die kumulierte Geschwindigkeitsänderung über 150 ms anschließend größer als 8 km/h ist.

Eine Verringerung des Schwellwerts für die Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung (siehe Anlage 110 und Anlage 113) führt hier zu keinen weiteren Überschreitungen. Es sind die gleichen Systeme bzw. Sensoren, welche den Schwellwert überschreiten. Dies gilt bis auf den Dewesoft Sensor am vorderen rechten Längsträger. Dieser liegt ab einer Verringerung des Schwellwertes auf 0,5 km/h innerhalb von 10 ms sowie dann auch bei 0,25 km/h innerhalb von 5 ms unterhalb des Schwellwerts.

Äquivalent kann man diesen Vergleich auch für die Querschleunigung durchführen (siehe Abbildung 4.26 oder Anlage 109).

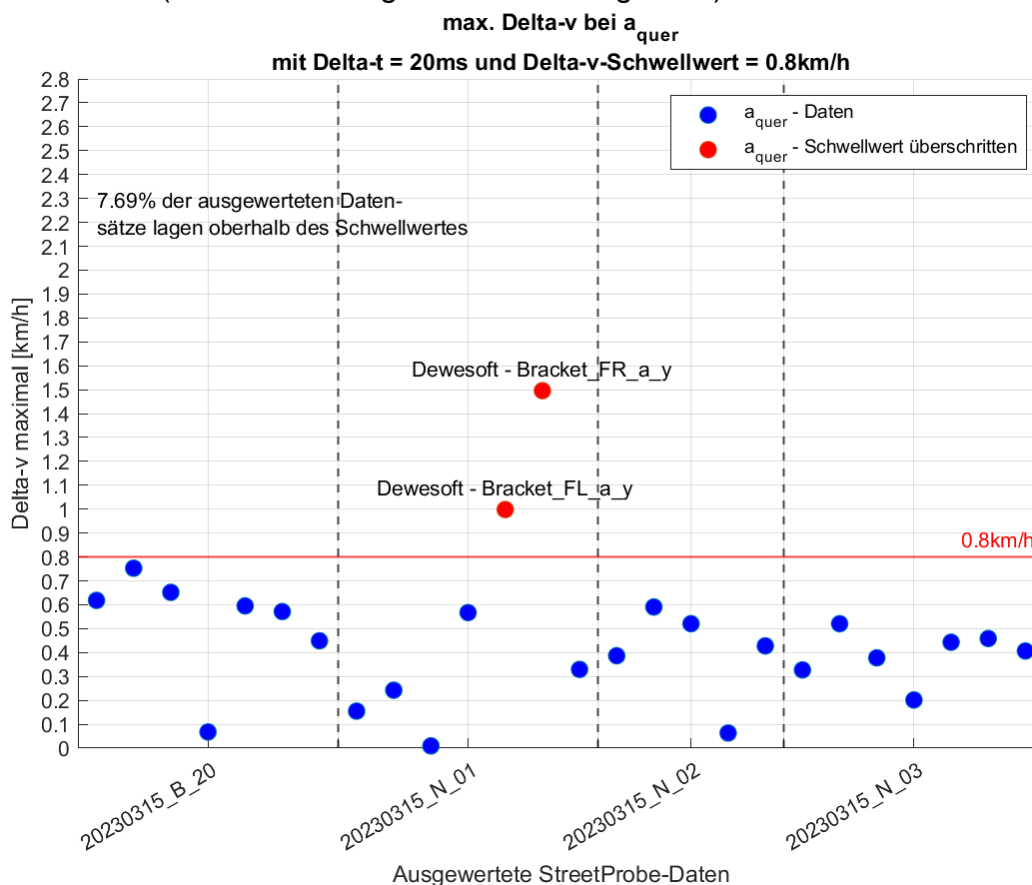


Abbildung 4.26: Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung der StreetProbe-Versuche (0,8 km/h innerhalb von 20 ms)

4 Ergebnisse der Auswertung

Dabei ist zu erkennen, dass in Querrichtung ebenfalls die Sensoren des Dewesoft-Systems an den Fronträgern allerdings nur im Versuch N01 den Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms überschreiten. Vergleichend dazu überschreitet bei einem Zeitintervall von 5 ms (Anlage 108) kein Sensor den Schwellwert von 0,8 km/h.

Eine wichtige Erkenntnis dieser Auswertung ist ebenfalls, dass die Geschwindigkeitsänderungen basierend auf den Berechnungen der Längs- und der Querbeschleunigung in fast allen Messdaten der Sensoren, während den Versuchen im Straßenverkehr „N01“ bis „N03“ unterhalb des Schwellwerts liegen. Bei Verringerung des Schwellwertes der Geschwindigkeitsänderung nähern sie sich dem Schwellwert an. Dies kann zum einen durch das Sensorrauschen bedingt sein. Dabei sollte berücksichtigt werden, dass alle Datensätze auf 1000 Hz interpoliert bzw. dezimiert wurden.

Die Auswertungen der anderen Schwellwertkombinationen sind in Anlage 110 bis Anlage 114 dargestellt. Bei Verringerung des Zeitintervalls für die Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung und bei Reduzierung des Schwellwerts kommt es bei 0,5 km/h innerhalb von 10 ms zu keiner Überschreitung. In Querrichtung kommt es jedoch bei gleichbleibendem Zeitintervall von 5 ms und einer Reduzierung des Schwellwertes für Δv auf 0,5 km/h zu einer Überschreitung des Dewesoft Sensors am vorderen rechten Längsträger. Alle anderen Messdaten überschreiten den Schwellwert in Querrichtung nicht (siehe Anlage 111). Bei gleichem Zeitintervall wie in Längsrichtung (10 ms) überschreiten beide Fronträgersensoren des Dewesoft den Schwellwert.

Bei einer weiteren Reduzierung auf 0,25 km/h innerhalb von 5 ms in Längs- und Querrichtung überschreiten in Längsrichtung wieder der PicDAQ 5 sowie ein Dewesoft-Sensor den Schwellwert. In Richtung der Querbeschleunigung überschreiten jetzt im Versuch N01 beide Dewesoft-Sensoren an den Längsträgern den Schwellwert. Im Versuch N03 liegt der Sensor des PicDAQ 5 knapp oberhalb des Schwellwertes. Dies kann aber auch ein Einfluss des Sensorrauschens oder der Überlagerung mit der Erdbeschleunigung geschuldet sein. Der Einfluss des Sensorrauschens bei Verringerung des Zeitintervalls für die Geschwindigkeitsänderung zum Zeitpunkt t_0 kann Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

Zusätzlich zu den Auswertungen der Messdaten soll eine Fehlerbetrachtung Aufschluss über mögliche Abweichungen in den berechneten Werten in Folge der Interpolation der Daten von Messsystemen niedrigerer Abtastraten sowie Dezimation von Messsystemen höherer Abtastraten liefern. Dies wird im nachfolgenden Kapitel betrachtet.

5 Fehlerbetrachtung

Jede Aufzeichnung von Messwerten ist mit Messfehlern verbunden. Wie Heisenberg einst feststellte „was wir erforschen, verändern wir auch“. Auch wenn sich seine Unschärfe-Relation eher auf die Bestimmung der Position und Geschwindigkeit von Teilchen bezieht, so kann man sie im weiteren Sinne auch auf die Messung von Beschleunigungssignalen anwenden.

Man unterscheidet zwischen systematischen und zufälligen Fehlern. Bei systematischen Fehlern sind dem Benutzer die Einflüsse, die zu einem Fehler führen, bekannt und sie können durch Beschreibung der physikalischen Beziehungen zum zu messenden Wert kompensiert werden. Zufällige Fehler hingegen können aus der Messung resultieren oder von unbekanntem Einflüssen auf den zu messenden Parameter. Diese können nur annähernd in den Messwerten korrigiert werden. Aus diesem Grund ist der Einfluss von zufälligen Fehlern auch deutlich größer als der von korrigierbaren systematischen Fehlern.

Innerhalb der Auswertung der Messdaten von Beschleunigungssensoren wurden diese für die Berechnung der Geschwindigkeitsänderung linear auf eine Abtastrate von 1000 Hz interpoliert (Upsampling) bzw. dezimiert (Downsampling). Bei Messreihen mit einer geringeren Abtastrate wie beispielsweise beim Unfalldatenspeicher (500 Hz) wurden dementsprechend lineare Mittelwerte für die Erweiterung der Tabelle gebildet. Bei Datensätzen höherer Abtastraten, wie beim Dewesoft-Messsystem mit 20.000 Hz, wurden Daten aus der Tabelle herausgekürzt. Dabei besteht im Gegensatz zum Unfalldatenspeicher die Gefahr, dass entscheidende Spitzen in den Daten verloren gehen und die Berechnung der Geschwindigkeitsänderung deshalb abweicht. Beide Vorgehensweisen sind demzufolge mit entsprechenden Fehlerfortpflanzungen verbunden. Aus diesem Grund wurden das Messsystem mit der niedrigsten Abtastrate (UDS) sowie mit der höchsten Abtastrate (Dewesoft) separat auf den Upsampling- bzw. Downsampling-Fehler hin überprüft.

Zuerst wurden für die Versuche mit dem Biofidel-Dummy und für einen t_0 -Schwellwert für die Geschwindigkeitsänderung von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms die jeweiligen Sensordaten in Längsrichtung für den Unfalldatenspeicher und die Sensoren des Dewesoft-Systems mit den interpolierten und dezimierten Daten während der Berechnung innerhalb der Applikation verglichen. Stellt man die absoluten Abweichungen der berechneten maximalen Geschwindigkeitsänderungen des UDS in einer Verteilung mit Hilfe der Histogramm-Funktion dar, ergibt sich dabei folgende Abbildung 5.1 (Anlage 115).

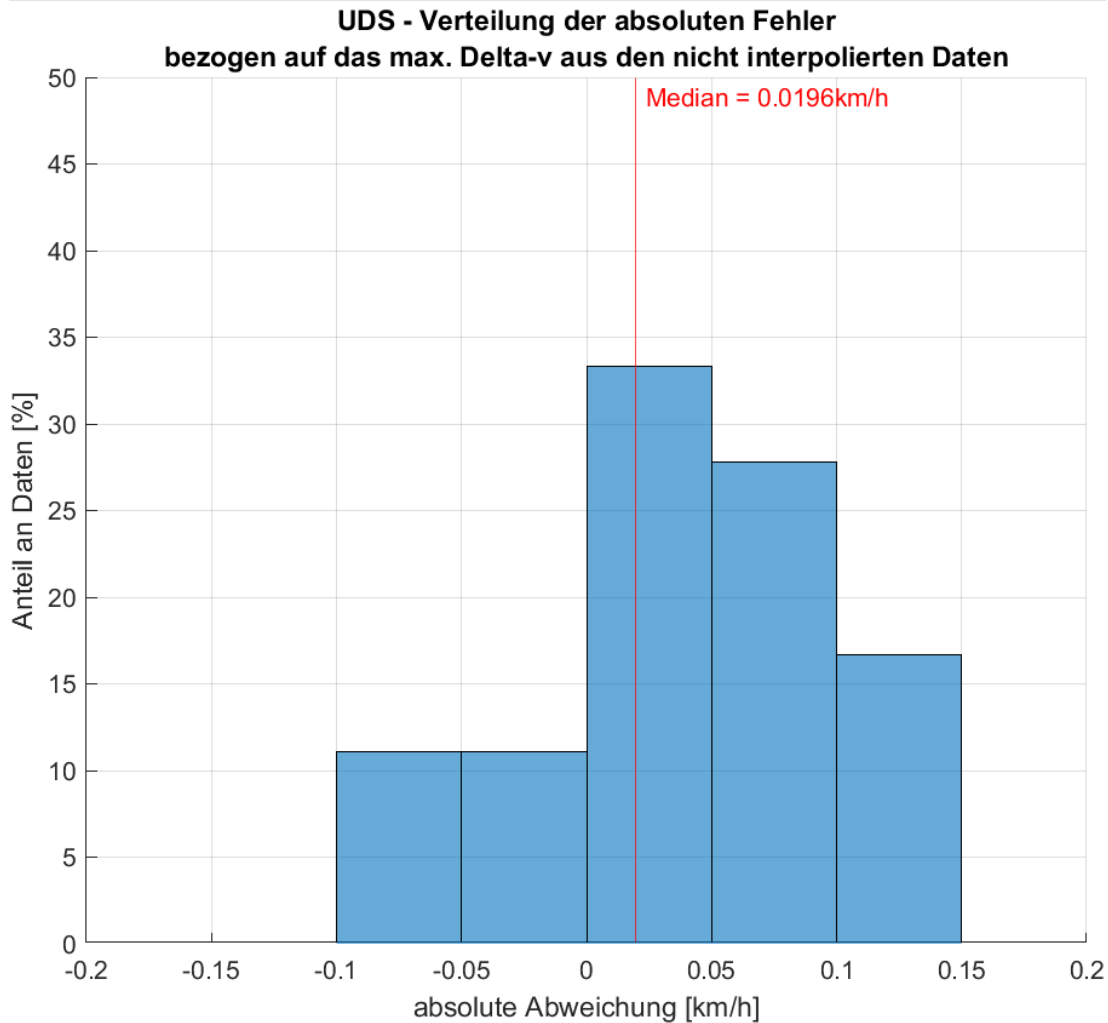


Abbildung 5.1: Absolute Abweichung der interpolierten Messwerte des UDS innerhalb der Versuche mit dem Biofidel-Dummy

Dabei liegen mehr als 50% der absoluten Abweichungen des UDS im Bereich zwischen -0,05 und 0,05 km/h. Im Verhältnis zum Schwellwert ist diese Abweichung gering und die relative Abweichung zum Schwellwert liegt demzufolge bei -6,25% bis + 6,25% für mehr als 50% der UDS-Beschleunigungsmesswerte in Längsrichtung bei den Versuchen mit dem Biofidel-Dummy. Der Median aller absoluten Abweichungen des UDS in Längsrichtung beträgt rund +0,02 km/h.

Die Darstellung der absoluten Abweichung des Dewesoft-Systems in Anlage 121 zeigt den großen Einfluss der Dezimation bei Messsystem mit höherer Abtastrate. Insbesondere die knapp 15% an Abweichungen größer des evaluierten Schwellwerts sind dabei problematisch. Dieser Downsampling-Fehler bezogen auf den Schwellwert führt zu relativen Fehlern bis knapp 300% (Anlage 123).

Vergleicht man aber die relative Abweichung zum Maximum der Geschwindigkeitsänderung basierend auf den nicht interpolierten Daten, wie in Abbildung 5.2 (Anlage 116) dargestellt, steigt beim UDS auch die relative Abweichung bezogen auf den Schwellwert, wie in Anlage 117 zu sehen ist.

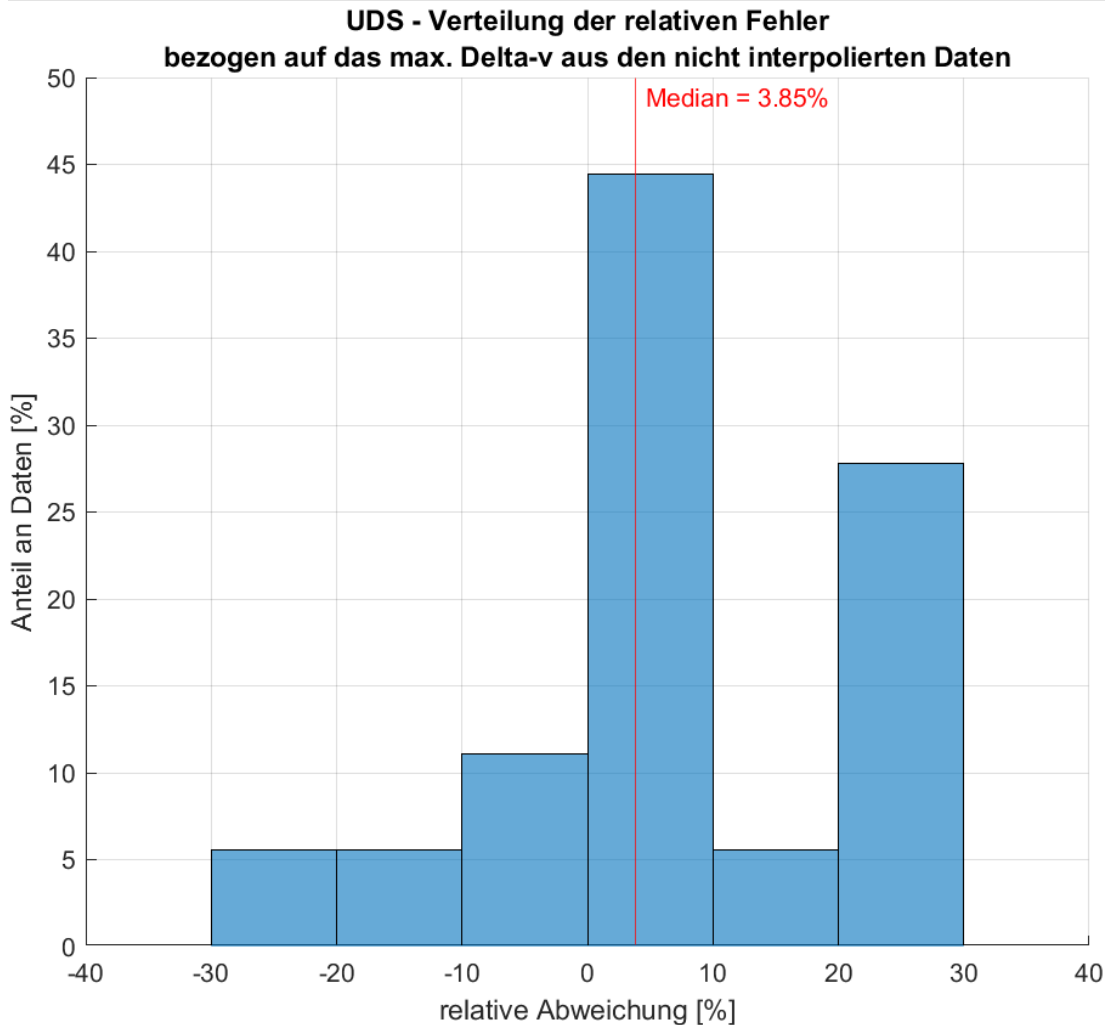


Abbildung 5.2: Relative Abweichung der interpolierten Messwerte des UDS innerhalb der Versuche mit dem Biofidel-Dummy

In dem Fall liegen die relativen Abweichungen in einem Gesamtspektrum von -30 bis +30% wobei mehr als 50% im Bereich zwischen -10% und +10% liegen. Der Median liegt bei +3,85% und es ist besonders der äußerste rechte Balken mit Abweichungen zwischen +20 und +30% zu beachten. In diesem Bereich liegen über ¼ der Datensätze des UDS und es muss geprüft werden, inwiefern diese relative Abweichung einen Einfluss auf die Auswertung hat.

Deshalb wurde zusätzlich ein Teil der Datensätze der Polizei Berlin ohne Interpolation ausgewertet. Diese 1171 Datensätze aus dem Jahr 2016 sollten Aufschluss darüber geben, ob die Interpolation bei den Daten des Unfalldatenspeichers aus dem Straßenverkehr und echten Unfällen ebenfalls zu hohen Abweichungen führen. Die relative Abweichung bezogen auf das berechnete Maximum der Geschwindigkeitsänderung wies dabei Abweichungen in ähnlichen Bereichen wie auch bei den Versuchen mit dem Biofidel-Dummy auf und lag im Bereich zwischen rund -30% und +30%. Die maximale absolute Abweichung betrug rund 1,51 km/h. Dies entspricht knapp 190% des Schwellwertes und ist demzufolge nicht vernachlässigbar. Die Verteilungsdarstellungen sind in Anlage 128, Anlage 130 und Anlage 132 zu sehen.

5 Fehlerbetrachtung

Aufgrund der Abweichungen wurden die Datensätze ohne Interpolation näher betrachtet. Sie wurden um die Einträge gekürzt, welche den Schwellwert für die Geschwindigkeitsänderung von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms erfüllen. Anschließend wurde die Verteilung der Interpolationsfehler dieser Datensätze betrachtet. Diese sind in Anlage 129 und Anlage 131 sowie die relative Abweichung bezogen auf den Schwellwert ist in folgender Abbildung 5.3 (Anlage 133) dargestellt.

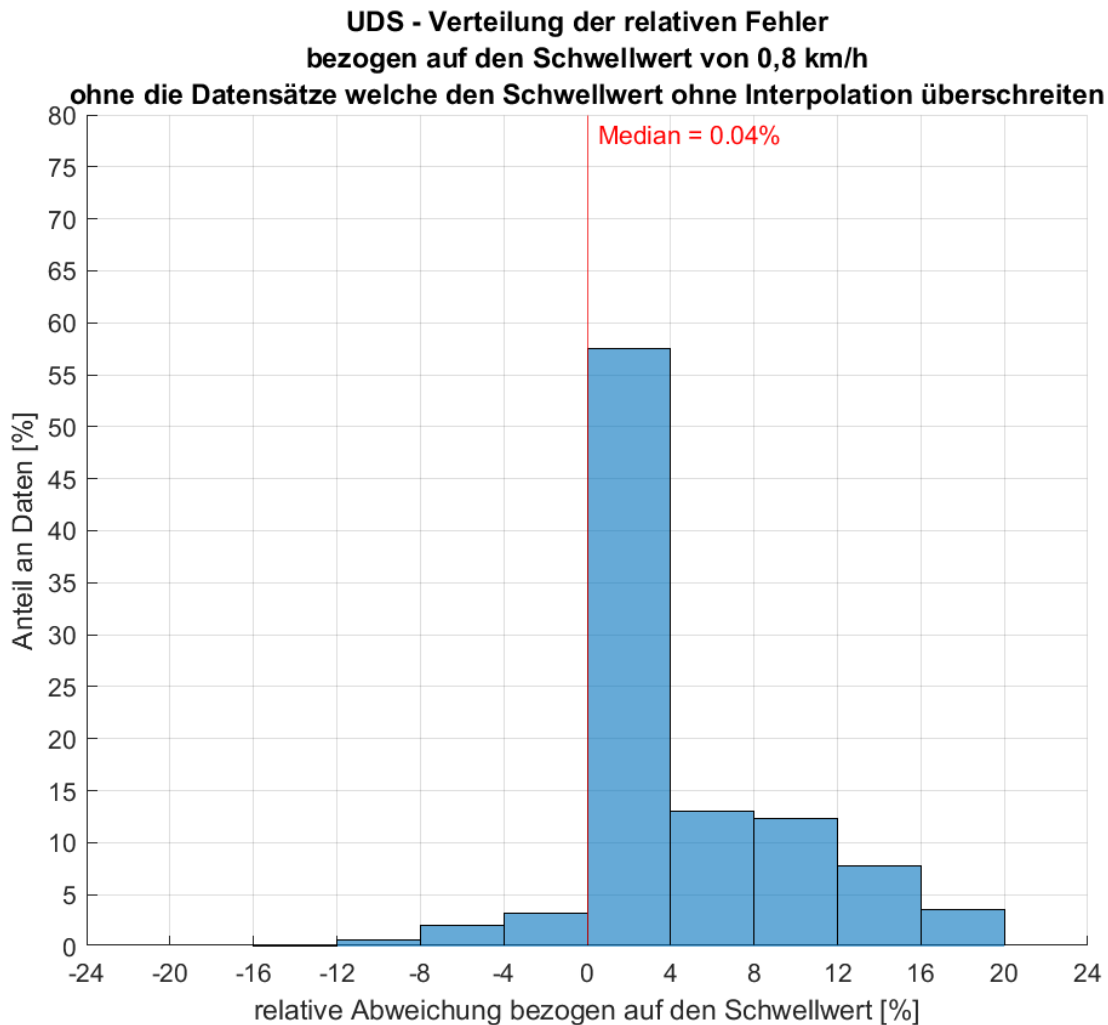


Abbildung 5.3: Relative Abweichung der interpolierten Messwerte des UDS in Bezug auf den Schwellwert bei 1171 Datensätzen der Polizei Berlin

Dabei ist zu erkennen, dass die Abweichung geringer ist als bei der Auswertung aller Datensätze. Die relative Abweichung im Vergleich zum Schwellwert liegt bei über 60% der Datensätze im Bereich zwischen -4% und +4%. Wie groß der Einfluss auf die Auswertung der gesamten Datensätze ist, kann Teil einer nächsten Ausarbeitung sein.

Die Auswertung der Dewesoft-Messdaten zeigt zum Teil ein umgekehrt proportionales Verhalten. Die relative Abweichung bezogen auf das Maximum der nicht dezimierten Daten sinkt bei höheren Geschwindigkeiten besonders im Bereich des Sensors am rechten Frontträger bei den Versuchen 33-G-01

5 Fehlerbetrachtung

und 33-U-02 (siehe Anlage 122). Dies war zu erwarten, denn die Kollisionsdauer ist geringer als bei den Versuchen mit niedrigerer Geschwindigkeit. Dementsprechend ist die durch den Aufprall entstandene und gemessene Beschleunigung höher und die daraus berechnete Geschwindigkeitsänderung größer. Dadurch kommt es beim Downsampling zu Fehlern über 100% die an dieser Stelle nicht zu vernachlässigen sind.

Aus diesem Grund wurden die berechneten Maxima der Geschwindigkeitsänderung, für die jeweils größten maximalen absoluten und relativen Fehler hin verglichen. Dies ist für den Unfalldatenspeicher in Anlage 118 und Anlage 119 sowie für das Dewesoft-System in Anlage 124 und Anlage 125 zu sehen. Ein Ausschnitt aus Anlage 119 aus dem Vergleich für den Datensatz des UDS mit der größten relativen Abweichung ist in der folgenden Abbildung 5.4 zu sehen.

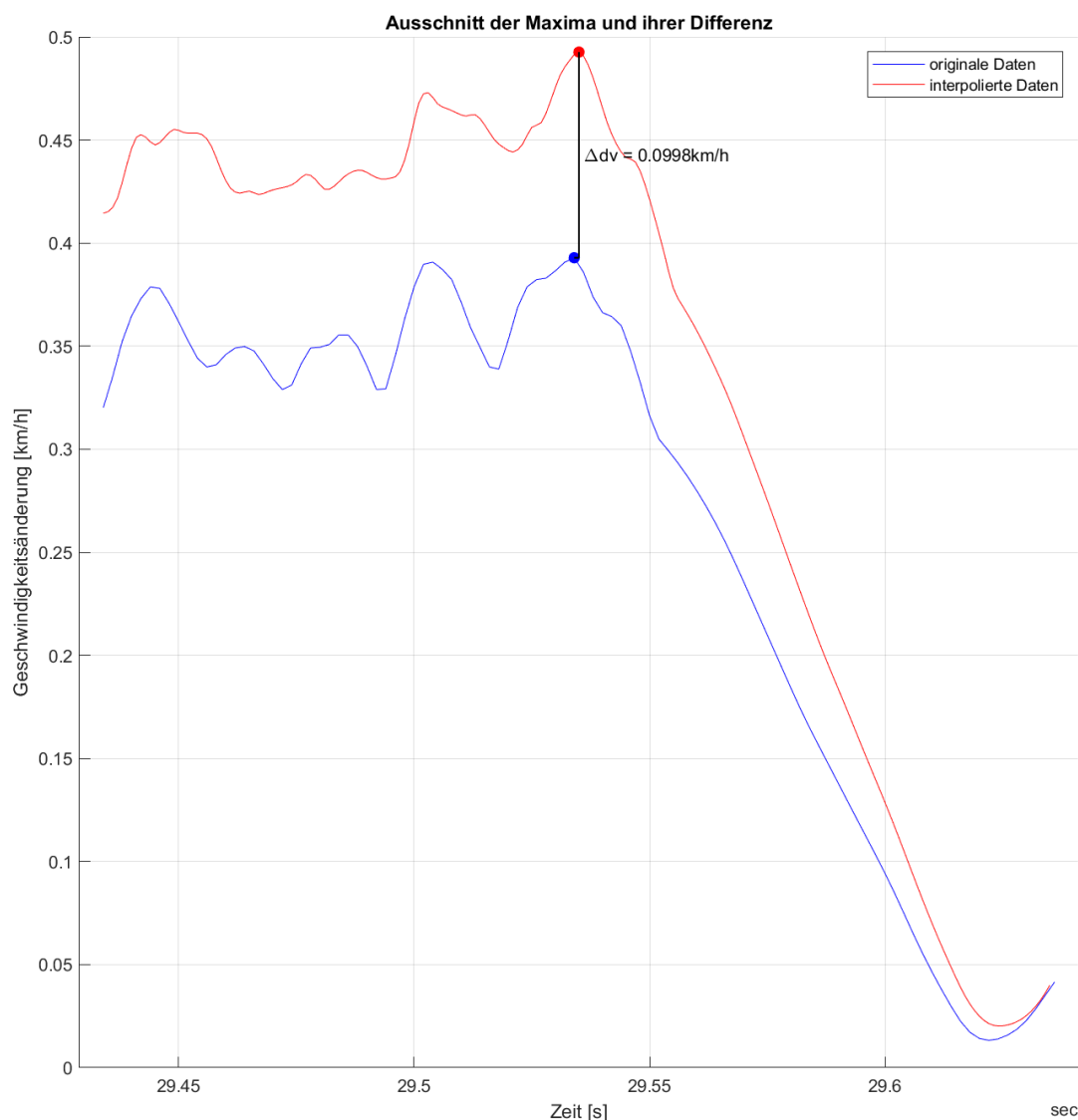


Abbildung 5.4: Darstellung der maximalen Differenz der Maxima der Geschwindigkeitsänderungen des UDS bei den Versuchen mit dem Biofidel-Dummy

Es ist deutlich zu erkennen, dass der zeitliche Versatz des Maximums beim UDS gering ist. In diesem Beispiel beträgt er nur 0,001 s. Die Differenz

der Graphen ist jedoch nicht zu vernachlässigen. Aus diesem Grund wurden auch die maximalen Differenzen der Zeitreihen analysiert. Dies ist als Darstellung der maximalen relativen und absoluten Abweichung der Zeitreihen des UDS in Anlage 120 dargestellt. Der Interpolationsfehler der Zeitreihe ist verglichen mit dem Interpolationsfehler der berechneten Maxima größer.

Beim Downsampling der Messdaten der Sensoren des Dewesoft-Systems steigt zudem der zeitliche Versatz der berechneten maximalen Geschwindigkeitsänderung. Im Beispiel von 33-U-02 beträgt er rund 0,07 s. Zudem beträgt die Differenz der maximalen Geschwindigkeitsänderung rund 2,25 km/h. Die Anlage 124 und Anlage 125 zeigen die absoluten und relativen Abweichungen der Berechnungen der Dewesoft-Messdaten. In den Anlage 126 und Anlage 127 ist zusätzlich und äquivalent zu den UDS-Messdaten die Abweichung der Zeitreihen dargestellt.

Aufgrund des großen Einflusses der Dezimation, vor allem bei den Messdaten des Dewesoft-Messsystems, wurde die Applikation entsprechend erweitert. Eine neue Option ermöglicht das separate Ausschalten der Upsampling bzw. Downsampling-Funktion für die jeweiligen Messsysteme. In diesem Fall wird die Berechnung auf Basis der Zeitschritte der Messwerte sowie mit dem unter Optionen festgelegten Δt Schwellwert für das Zeitfenster durchgeführt. Eine vergleichende Auswertung der Versuche mit dem Biofidel-Dummy befindet sich für eine Geschwindigkeitsänderung von 0,8 km/h in Anlage 71, Anlage 76 und Anlage 81 (für $\Delta v = 0,5$ km/h in Anlage 86, Anlage 91 und Anlage 96 sowie für $\Delta v = 0,25$ km/h in Anlage 101, Anlage 106 und Anlage 111). Eine Untersuchung des Einflusses der Sampling-Funktion könnte Teil einer weiteren Ausarbeitung der Betrachtung der Messdaten sein.

6 Zusammenfassung

Die umfassende Auswertung der Geschwindigkeitsänderungen bezogen auf den Schwellwert für die Festlegung des Zeitpunktes t_0 des Ereignisses und die Variation des Zeitfensters und des Schwellwerts brachten umfangreiche Erkenntnisse über die Möglichkeiten der Erkennung von Fußgänger-Unfällen.

In der Auswertung der Datensätze der Polizei Berlin zeigte sich, dass eine Reduzierung des Schwellwertes für zu einer geringeren Anzahl an Datensätzen in Längsrichtung führte. Außerdem wurde durch den Vergleich der verschiedenen Zeitintervalle in Querrichtung gezeigt, dass die Beschleunigung im Falle des gesetzlichen Zeitintervalls von 5 ms deutlich höher sein muss, um den Zeitpunkt des Ereignisses auszulösen. Es gilt daher als kritisch zu betrachten, ob dieses Zeitintervall sinnvoll ist. Ein identisches Zeitintervall, wie für die Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung, stellte sich im Rahmen der Analyse der Ergebnisse als effektiver heraus.

Die Auswertung der Versuche mit dem Biofidel-Dummy zeigten deutlich, dass Zusammenstöße bei Geschwindigkeiten unter 22 km/h nur selten zu einem Überschreiten des Schwellwertes von 0,8 km/h binnen 20 ms führen und zuerst von den Pedestrian Protection Sensoren erkannt werden. Anstöße mit Fußgängern sind in diesem Bereich wahrscheinlich nicht eindeutig zu detektieren. Bei Geschwindigkeiten über 22 km/h überschreiten mehrere Geschwindigkeitsänderungen der Sensoren der Messsysteme die Schwelle für t_0 . Bei diesen Messreihen gilt es zu überprüfen, ob auch der Schwellwert für die Auslösung einer Speicherung mit einer kumulierten Geschwindigkeitsänderung von 8 km/h innerhalb von 150 ms überschritten wird. Erst dann würde es zu einer Speicherung des Datensatzes im Ereignisdatenspeicher kommen, wodurch sie für Unfallrekonstruktionen nutzbar wären.

Bei der Auswertung der dynamischen Versuche im Straßenverkehr („StreetProbe“) zeigte sich zudem, dass eine Verkürzung des Zeitintervalls der kumulierten Geschwindigkeitsänderung in Richtung der Längsbeschleunigung auf 10 ms bei einer Geschwindigkeitsänderung von 0,5 km/h zu weniger detektierten Ereignissen führte. Inwiefern diese Schwellwertkombination sinnvoll ist, gilt es anhand der Datensätze der Polizei Berlin zu überprüfen. In einer nächsten Ausarbeitung müssten die extrahierten Datensätze analysiert und, wie bereits erwähnt, die Anonymisierung umkehrt werden. Anschließend können die Datensätze auf reale Unfälle überprüft werden.

Für beide Versuchsauswertungen sind die Messdaten des PicDAQ 4 (blau) mit dem Beschleunigungssensor am Airbag-Steuergerät (ACM) kritisch zu betrachten. Aufgrund des möglichen Sprunges in den Messdaten kann es zu Fehlern in der Berechnung der Geschwindigkeitsänderung kommen, da diese nur mit Hilfe der Median-Funktion korrigiert wurden. Im Idealfall würden

weitere Messungen Aufschluss über die Ursache des Sprunges und dessen Vermeidung in den Messdaten geben.

Ferner können mit Hilfe der Applikation auch die Einflüsse des Up- bzw. Downsampling tiefergehend analysiert werden. Dabei ist auch der Fehler durch die Dezimation bei den anderen Messsystemen wie den PicDAQ-Systemen zu prüfen. Außerdem kann eine umfangreiche Analyse des Fehlers bei den Auswertungen der Datensätze der Polizei durchgeführt werden.

Der Ruck ist nach wie vor ein alternativer Parameter zur eindeutigen Erkennung von Anstößen, aber bislang nicht als gesetzlicher Schwellwert definiert. Durch Prüfung der Datensätze, welche im Bereich des Rucks zwischen 500 und 2000 m/s^3 liegen, kann der, in dieser Ausarbeitung bestimmte, iterative Schwellwert von 620 m/s^3 für einen mittleren Ruck innerhalb von 5 ms bzw. 915 m/s^3 für den maximalen Ruck in Längsrichtung weiter verfeinert werden. Dies ermöglicht eine Argumentation der Einführung des Rucks als weitere Schwellwertdefinition.

Im Resultat bleibt die Detektion von Fußgängerunfällen mit den aktuell gesetzlich geltenden Schwellwerten für eine Speicherung im Ereignisdatenspeicher weiterhin schwierig. Neben der möglichen Reduzierung des Schwellwertes in Längsrichtung auf 0,5 km/h innerhalb von 10 ms, bringt eine Reduzierung des Schwellwertes in Querrichtung ohne Anpassung des Zeitintervalls keinen besonderen Einfluss, da dieses bei nur 5 ms festgelegt wurde. Dadurch sind, für die Überschreitung des gesetzlichen Schwellwertes von größer 0,8 km/h innerhalb von 5 ms, Beschleunigungen von weit über 40 m/s^2 notwendig. Dies ist bei Fußgängerunfällen aber keinesfalls zu erwarten, wodurch sich im Resultat dieser Diplomarbeit zwei mögliche Schwellwert-Kombinationen anbieten. Zum einen wäre eine identische Schwellwert-Kombination in Längs- und Querrichtung möglich. Dabei besteht die Option des gesetzlichen Schwellwertes einer Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung von größer 0,8 km/h binnen 20 ms oder alternativ der im Rahmen dieser Diplomarbeit evaluierte Schwellwert von 0,5 km/h binnen 10 ms. Auf der anderen Seite könnte auch nur der Schwellwert für die Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung auf eine der zuvor genannten Kombinationen angepasst werden. Durch eine dieser Anpassungen wird der Schwellwert für den Zeitpunkt des Ereignisses, vor allem in Querrichtung, häufiger überschritten und deutlich mehr Anstöße führen zu einer Speicherung im Ereignisdatenspeicher.

Die Erkenntnisse dieser Diplomarbeit sowie die erstellte Applikation, welche ohne Mathworks-Lizenz nutzbar ist, können für eine umfassende Betrachtung dieser und zukünftiger Messdaten genutzt werden. Weitere Versuche und deren Auswertung können zudem eine der betrachteten Schwellwert-Kombinationen als effektiver definieren, um zukünftig Fußgängerunfälle sicherer detektieren und die Daten im Ereignisdatenspeicher hinterlegen zu können.

Literatur- und Quellenverzeichnis

1. STATISTISCHES BUNDESAMT. *Anzahl der getöteten Fußgänger bei Straßenverkehrsunfällen in Deutschland von 1980 bis 2023* [online], 5. Juli 2024. 21 August 2024 [Zugriff am: 21. August 2024]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/459038/umfrage/anzahl-der-fussgaengerunfaelle-deutschland/>
2. STATISTISCHES BUNDESAMT. *Anzahl der Getöteten bei Straßenverkehrsunfällen in Deutschland von 1950 bis 2023* [online], 5. Juli 2024. 21 August 2024 [Zugriff am: 21. August 2024]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/185/umfrage/todesfaelle-im-strassenverkehr/>
3. STATISTISCHES BUNDESAMT. *Unfallbilanz 2023: 42 Verkehrstote mehr als im Vorjahr*, 27. Februar 2024.
4. STATISTISCHES BUNDESAMT. *Durchschnittliche Geschwindigkeit auf Hauptverkehrsstraßen deutscher Großstädte zur Hauptverkehrszeit im Jahr 2018* [online], 2018. 21 August 2024 [Zugriff am: 21. August 2024]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1079302/umfrage/durchschnittliche-fahrgeschwindigkeit-zur-hauptverkehrszeit-in-deutschen-grossstaedten/>
5. REIF, K., Hg. *Sensoren im Kraftfahrzeug*. 3. Aufl. 2017. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016. SpringerLink Bücher. ISBN 9783658112110.
6. DATENERFASSUNGSSYSTEME (DAQ) UND LÖSUNGEN. *SIRIUS® Technische Daten* [online]. 25 Juli 2024 [Zugriff am: 21. August 2024]. Verfügbar unter: <https://dewesoft.com/de/produkte/sirius/technische-daten#dualcoreadc-amplifiers>
7. BREUER, S. *Fahrzeugdynamik. Mechanik des bewegten Fahrzeugs*. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. SpringerLink Bücher. ISBN 9783658094751.
8. SCHÖNEBURG, R., Hg. *Integrale Sicherheit Von Kraftfahrzeugen. Biomechanik - Unfallvermeidung - Insassenschutz - Sensorik - Sicherheit Im Entwicklungsprozess*. 5th ed. Wiesbaden: Springer Vieweg. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2024. ATZ/MTZ-Fachbuch Series. ISBN 9783658428068.
9. TRAUTMANN, T. *Grundlagen der Fahrzeugmechatronik. Eine praxisorientierte Einführung für Ingenieure, Physiker und Informatiker*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009. SpringerLink Bücher. ISBN 9783834895738.
10. JOHANNSEN, H. *Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion. Grundlagen der Unfallaufklärung*. 3rd ed. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2013. ATZ/MTZ-Fachbuch Ser. ISBN 9783658015947.

11. BURG, H. und A. MOSER, Hg. *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion. Unfallaufnahme, Fahrdynamik, Simulation*. 3. Aufl. 2017. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. SpringerLink Bücher. ISBN 9783658161439.
12. WIRTSCHAFTSKOMMISSION DER VEREINTEN NATIONEN FÜR EUROPA. *UN/ECE-Regelung Nr. 127 — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich ihrer Eigenschaften im Zusammenhang mit der Fußgängersicherheit [2020/638]*, 18. Juni 2016.
13. REUTER, R. *Safety Companion* [online]. *Knowledge for Tomorrow's Automotive Engineering*, 2024 [Zugriff am: 21. August 2024]. Verfügbar unter: <https://www.carhs.de/de/companion-poster/product/safetycompanion-2024-pdf-download.html>
14. PISCHINGER, S. und U. SEIFFERT, Hg. *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 9., erweiterte und ergänzte Auflage. [Place of publication not identified]: MORGAN KAUFMANN, 2020. Springer eBook Collection. ISBN 9783658255572.
15. BRAESS, H.-H. *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. 6., aktualisierte und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2012. SpringerLink Bücher. ISBN 9783834882981.
16. ERSOY, M. und S. GIES, Hg. *Fahrwerkhandbuch. Grundlagen - Fahrdynamik - Fahrverhalten - Komponenten - elektronische Systeme - Fahrerassistenz - autonomes Fahren - Perspektiven*. 5. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017. ATZ/MTZ-Fachbuch. ISBN 9783658154677.
17. KRAMER, F. *Passive Sicherheit von Kraftfahrzeugen Biomechanik — Simulation — Sicherheit im Entwicklungsprozess*. 3., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: Vieweg+Teubner, 2009. SpringerLink Bücher. ISBN 9783834892546.
18. WINNER, H., S. HAKULI, F. LOTZ und C. SINGER, Hg. *Handbuch Fahrerassistenzsysteme. Grundlagen, Komponenten und Systeme für aktive Sicherheit und Komfort*. 3., überarbeitete und ergänzte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. ATZ/MTZ-Fachbuch. ISBN 9783658057343.
19. WINNER, H., K.C.J. DIETMAYER, L. ECKSTEIN, M. JIPP, M. MAURER und C. STILLER, Hg. *Handbuch Assistiertes und Automatisiertes Fahren. Grundlagen, Komponenten und Systeme Für Assistiertes und Automatisiertes Fahren*. 4th ed. Wiesbaden: Springer Vieweg. in Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH, 2024. ATZ/MTZ-Fachbuch Series. ISBN 9783658384869.
20. DIETSCHKE, K.-H. und K. REIF. *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. 30., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2022. ISBN 9783658363864.

21. WIRTSCHAFTSKOMMISSION DER VEREINTEN NATIONEN FÜR EUROPA. *UN/ECE-Regelung Nr. 152 - Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich des Notbremsassistentensystems (AEBS) in Fahrzeugen der Klassen M1 und N1 [2020/ 1597]*, 3. Januar 2021.
22. WIRTSCHAFTSKOMMISSION DER VEREINTEN NATIONEN FÜR EUROPA. *UN/ECE-Regelung Nr. 160 — Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich des Ereignisdatenspeichers [2021/1215]*, 26. Juli 2021.
23. NATIONAL HIGHWAY TRAFFIC SAFETY ADMINISTRATION, DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. *49 CFR Part 563*, 28. August 2006.
24. IEEE STANDARDS ASSOCIATION. *1616-2021 - IEEE Standard for Motor Vehicle Event Data Recorder (MVEDR)*: IEEE, 23. September 2021. ISBN 1504480198.
25. NHTSA. *Event Data Recorder | NHTSA* [online], 2024. 21 August 2024 [Zugriff am: 21. August 2024]. Verfügbar unter: <https://www.nhtsa.gov/research-data/event-data-recorder#overview-10516>
26. SCHRECK, G. *Fahrzeugdaten*. Dissertation. Nomos-Universitätschriften Recht. Band 976. ISBN 9783748907596.
27. WEHE, D. und H. SILLER, Hg. *Handbuch Polizeimanagement. 2.*, vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler, 2023. ISBN 9783658343873.
28. SAE, *Instrumentation for Impact Test - Part 1 - Electronic Instrumentation*: SAE International. Verfügbar unter: https://www.sae.org/standards/content/j2111/1_201403/
29. ALEM, N. und M. PERRY. *USAARL Report No. 95-13 - Design of Digital Low-pass Filters for Time-Domain Recursive Filtering of Impact Acceleration Signals*. Fort Rucker, 1995.
30. HERING, E., R. MARTIN und M. STROHER. *Physik für Ingenieure*. 13. Aufl. 2021: Springer Vieweg, 2021. ISBN 9783662631775.
31. BOCKENHEIMER, M. *Möglichkeiten und Grenzen der Erkennung von Anstößen anhand von Beschleunigungsdaten aus Pkw*. Diplomarbeit. Dresden, 29. August 2022.
32. RICHARD, H.A. und M. SANDER. *Technische Mechanik. Dynamik. Grundlagen — effektiv und anwendungsnah*. Wiesbaden: Vieweg, 2008. Springer eBook Collection Computer Science & Engineering. ISBN 9783834894243.

33. WIRTSCHAFTSKOMMISSION DER VEREINTEN NATIONEN FÜR EUROPA. *UN/ECE-Regelung Nr. 79 - Einheitliche Bedingungen für die Genehmigung der Fahrzeuge hinsichtlich der Lenkanlage [2018/1947]*, 16. Oktober 2018.
34. GRAßL, L. *Genauigkeit von EDR-Daten in Abhängigkeit vom fahrdynamischen Zustand*. Master-Thesis. Graz, 4. Oktober 2023.

Eidesstattliche Erklärung

Das vorliegende Dokument wurde an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden unter der Leitung von Prof. Dr. rer. nat. Toralf Trautmann angefertigt.

Hiermit erkläre ich, dass ich die vorliegende Arbeit zum Thema

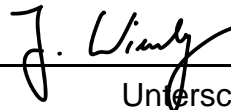
„Analyse und Auswertung von Unfalldatenspeicher-Einträgen bei Zusammenstößen mit vulnerablen Verkehrsteilnehmern“

Selbstständig und ohne Benutzung anderer Quellen und Hilfsmittel als angegeben angefertigt habe. Insbesondere versichere ich, dass ich alle wörtlichen und sinngemäßen Übernahmen aus anderen Werken als solche kenntlich gemacht habe.

Ferner gestatte ich der Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, die vorliegende Diplomarbeit unter Beachtung insbesondere urheber-, datenschutz- und wettbewerbsrechtlicher Vorschriften für Lehre und Forschung zu nutzen.

Dresden, den 01.10.2024

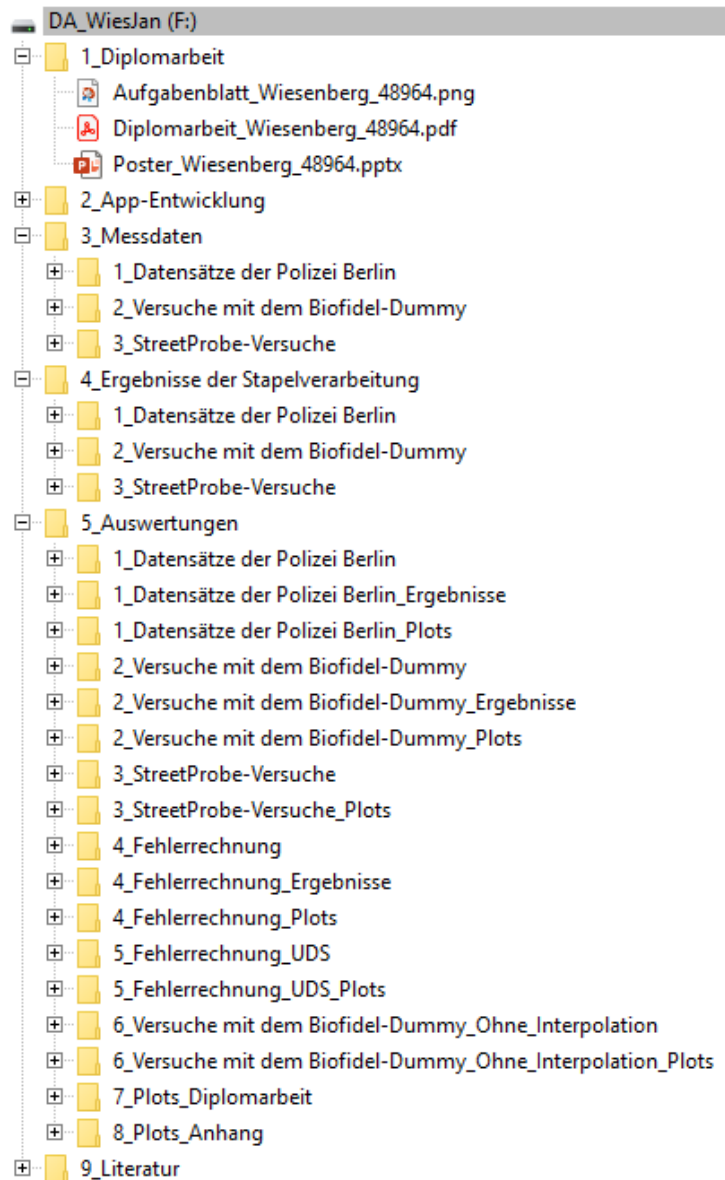
Ort, Datum



Unterschrift

Anlagenverzeichnis

Datenträger



Parameter des Ereignisdatenspeicher nach UN/ECE-Regelung 160

Anlage 1: Tabelle an Parametern des Ereignisdatenspeichers nach UN/ECE-Regelung 160 - Teil 1	_____	- 1 -
Anlage 2: Tabelle an Parametern des Ereignisdatenspeichers nach UN/ECE-Regelung 160 - Teil 2	_____	- 2 -
Anlage 3: Tabelle an Parametern des Ereignisdatenspeichers nach UN/ECE-Regelung 160 - Teil 3	_____	- 3 -
Anlage 4: Tabelle an Parametern des Ereignisdatenspeichers nach UN/ECE-Regelung 160 - Teil 4	_____	- 4 -
Anlage 5: Tabelle an Parametern des Ereignisdatenspeichers nach UN/ECE-Regelung 160 - Teil 5	_____	- 5 -
Anlage 6: Tabelle an Parametern des Ereignisdatenspeichers nach UN/ECE-Regelung 160 - Teil 6 und Fußnoten	_____	- 6 -

Programmablaufpläne

- Anlage 7: Programmablaufplan - Crash Data Evaluation_____ - 7 -
- Anlage 8: Programmablaufplan - "CFC_Filter_Func"_____ - 8 -
- Anlage 9: Programmablaufplan - "Spec_Char_Test_Func" _____ - 9 -

Ordnerstruktur

- Anlage 10: Beispiel der Ordnerstruktur der Versuche mit dem Biofidel-Dummy vom 04.01.2023 _____ - 10 -

Auswertung der Datensätze der Polizei Berlin - $\Delta v \geq 0,8$ km/h

- Anlage 11: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____ - 11 -
- Anlage 12: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____ - 12 -
- Anlage 13: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____ - 13 -
- Anlage 14: Vergleich der Geschwindigkeitsänderungen in Längs- und Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20/5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____ - 14 -
- Anlage 15: Vergleich der Geschwindigkeitsänderungen in Längs- und Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)_____ - 15 -
- Anlage 16: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung der resultierenden Beschleunigung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____ - 16 -
- Anlage 17 & 18: Statistische Verteilung der Geschwindigkeitsänderung in Anzahl und Prozent (links) und prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,8 km/h innerhalb von 20/5 ms (rechts) (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____ - 17 -
- Anlage 19 & 20: Statistische Verteilung der Geschwindigkeitsänderung in Anzahl und Prozent (links) und prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (rechts) (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____ - 18 -
- Anlage 21: Statistische Verteilung (Anzahl und Prozent) der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung bei einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)_____ - 19 -
- Anlage 22: Prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen in Längsrichtung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____ - 19 -
- Anlage 23: Statistische Verteilung (Anzahl und Prozent) der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung bei einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)_____ - 20 -

Anlage 24: Prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen in Querrichtung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,8 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____	- 20 -
Anlage 25: Statistische Verteilung (Anzahl und Prozent) der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung bei einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____	- 21 -
Anlage 26: Prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen in Querrichtung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____	- 21 -
Anlage 27: Statistische Verteilung (Anzahl und Prozent) der Geschwindigkeitsänderung der resultierenden Beschleunigung bei einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____	- 22 -
Anlage 28: Prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen der resultierenden Beschleunigung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____	- 22 -

Auswertung der Datensätze der Polizei Berlin - $\Delta v \geq 0,5$ km/h

Anlage 29: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____	- 23 -
Anlage 30: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____	- 24 -
Anlage 31: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____	- 25 -
Anlage 32: Vergleich der Geschwindigkeitsänderungen in Längs- und Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10/5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____	- 26 -
Anlage 33: Vergleich der Geschwindigkeitsänderungen in Längs- und Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____	- 27 -
Anlage 34: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung der resultierenden Beschleunigung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____	- 28 -
Anlage 35 & 36: Statistische Verteilung der Geschwindigkeitsänderung in Anzahl und Prozent (links) und prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,5 km/h innerhalb von 10/5 ms (rechts) (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____	- 29 -
Anlage 37 & 38: Statistische Verteilung der Geschwindigkeitsänderung in Anzahl und Prozent (links) und prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (rechts) (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____	- 30 -

Anlagenverzeichnis

Anlage 39: Statistische Verteilung (Anzahl und Prozent) der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung bei einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)	_____	- 31 -
Anlage 40: Prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen in Längsrichtung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)	_____	- 31 -
Anlage 41: Statistische Verteilung (Anzahl und Prozent) der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung bei einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)	_____	- 32 -
Anlage 42: Prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen in Querrichtung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,5 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)	_____	- 32 -
Anlage 43: Statistische Verteilung (Anzahl und Prozent) der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung bei einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)	_____	- 33 -
Anlage 44: Prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen in Querrichtung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)	_____	- 33 -
Anlage 45: Statistische Verteilung (Anzahl und Prozent) der Geschwindigkeitsänderung der resultierenden Beschleunigung bei einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)	_____	- 34 -
Anlage 46: Prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen der resultierenden Beschleunigung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)	_____	- 34 -

Auswertung der Datensätze der Polizei Berlin - $\Delta v \geq 0,25$ km/h

Anlage 47: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)	_____	- 35 -
Anlage 48: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)	_____	- 36 -
Anlage 49: Vergleich der Geschwindigkeitsänderungen in Längs- und Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)	_____	- 37 -
Anlage 50: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung der resultierenden Beschleunigung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)	_____	- 38 -
Anlage 51 & 52: Statistische Verteilung der Geschwindigkeitsänderung in Anzahl und Prozent (links) und prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,25 km/h innerhalb von 5ms (rechts) (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)	_____	- 39 -

Anlagenverzeichnis

- Anlage 53: Statistische Verteilung (Anzahl und Prozent) der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung bei einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____ - 40 -
- Anlage 54: Prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen in Längsrichtung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____ - 40 -
- Anlage 55: Statistische Verteilung (Anzahl und Prozent) der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung bei einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____ - 41 -
- Anlage 56: Prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen in Querrichtung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____ - 41 -
- Anlage 57: Statistische Verteilung (Anzahl und Prozent) der Geschwindigkeitsänderung der resultierenden Beschleunigung bei einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____ - 42 -
- Anlage 58: Prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen der resultierenden Beschleunigung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____ - 42 -

Auswertung der Datensätze der Polizei Berlin - Maximaler Ruck

- Anlage 59: Auswertung des maximalen Rucks und iterativer Schwellwert – 95. Perzentil (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____ - 43 -
- Anlage 60: Vergleich des maximalen Rucks in Längs- und Querrichtung mit einem Schwellwert von 915 m/s³ (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____ - 44 -
- Anlage 61: Auswertung des maximalen Rucks basierend auf den Datensätzen, welche den Schwellwert der Geschwindigkeitsänderung von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms erfüllen (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____ - 45 -
- Anlage 62: Vergleich des maximalen Rucks in Längs- und Querrichtung mit einem Schwellwert von 620 m/s³ (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____ - 46 -

Auswertung der Datensätze der Polizei Berlin - Mittlerer Ruck innerhalb von 5 ms

- Anlage 63: Auswertung des mittleren Rucks innerhalb von 5 ms und iterativer Schwellwert – 95. Perzentil (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____ - 47 -
- Anlage 64: Vergleich des mittleren Rucks innerhalb von 5 ms in Längs- und Querrichtung mit einem Schwellwert von 730 m/s³ (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____ - 48 -
- Anlage 65: Auswertung des mittleren Rucks innerhalb von 5 ms basierend auf den Datensätzen, welche den Schwellwert der Geschwindigkeitsänderung von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms erfüllen (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____ - 49 -
- Anlage 66: Vergleich des mittleren Rucks innerhalb von 5 ms in Längs- und Querrichtung mit einem Schwellwert von 560 m/s³ (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation) _____ - 50 -

Auswertung der Versuche mit dem Biofidel-Dummy - $\Delta v \geq 0,8$ km/h

Anlage 67: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - mit Up- und Downsampling) _____ - 51 -

Anlage 68: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 1 - mit Up- und Downsampling) _____ - 52 -

Anlage 69: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 2 - mit Up- und Downsampling) _____ - 52 -

Anlage 70: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 3 - mit Up- und Downsampling) _____ - 53 -

Anlage 71: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - ohne Up- und Downsampling) _____ - 54 -

Anlage 72: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - mit Up- und Downsampling) _____ - 55 -

Anlage 73: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 1 - mit Up- und Downsampling) _____ - 56 -

Anlage 74: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 2 - mit Up- und Downsampling) _____ - 56 -

Anlage 75: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 3 - mit Up- und Downsampling) _____ - 57 -

Anlage 76: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - ohne Up- und Downsampling) _____ - 58 -

Anlage 77: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - mit Up- und Downsampling) _____ - 59 -

Anlage 78: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 1 - mit Up- und Downsampling) _____ - 60 -

Anlage 79: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 2 - mit Up- und Downsampling) _____ - 60 -

Anlage 80: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 3 - mit Up- und Downsampling) _____ - 61 -

Anlage 81: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - ohne Up- und Downsampling) _____ - 62 -

Auswertung der Versuche mit dem Biofidel-Dummy - $\Delta v \geq 0,5$ km/h

Anlage 82: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - mit Up- und Downsampling) _____ - 63 -

Anlage 83: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 1 - mit Up- und Downsampling) _____ - 64 -

Anlage 84: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 2 - mit Up- und Downsampling) _____ - 64 -

Anlage 85: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 3 - mit Up- und Downsampling) _____ - 65 -

Anlage 86: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - ohne Up- und Downsampling) _____ - 66 -

Anlage 87: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - mit Up- und Downsampling) _____ - 67 -

Anlage 88: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 1 - mit Up- und Downsampling) _____ - 68 -

Anlage 89: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 2 - mit Up- und Downsampling) _____ - 68 -

Anlage 90: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 3 - mit Up- und Downsampling) _____ - 69 -

Anlage 91: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - ohne Up- und Downsampling) _____ - 70 -

Anlage 92: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - mit Up- und Downsampling) _____ - 71 -

Anlage 93: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 1 - mit Up- und Downsampling) _____ - 72 -

Anlage 94: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 2 - mit Up- und Downsampling) _____ - 72 -

Anlagenverzeichnis

- Anlage 95: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 3 - mit Up- und Downsampling) _____ - 73 -
- Anlage 96: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - ohne Up- und Downsampling) _____ - 74 -

Auswertung der Versuche mit dem Biofidel-Dummy - $\Delta v \geq 0,25$ km/h

- Anlage 97: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - mit Up- und Downsampling) _____ - 75 -
- Anlage 98: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 1 - mit Up- und Downsampling) _____ - 76 -
- Anlage 99: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 2 - mit Up- und Downsampling) _____ - 76 -
- Anlage 100: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 3 - mit Up- und Downsampling) _____ - 77 -
- Anlage 101: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - ohne Up- und Downsampling) _____ - 78 -
- Anlage 102: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - mit Up- und Downsampling) _____ - 79 -
- Anlage 103: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 1 - mit Up- und Downsampling) _____ - 80 -
- Anlage 104: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 2 - mit Up- und Downsampling) _____ - 80 -
- Anlage 105: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 3 - mit Up- und Downsampling) _____ - 81 -
- Anlage 106: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - ohne Up- und Downsampling) _____ - 82 -

Auswertung der StreetProbe-Versuche - $\Delta v \geq 0,8$ km/h

- Anlage 107: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (StreetProbe-Versuche - mit Up- und Downsampling) _____ - 83 -

Anlage 108: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 5 ms (StreetProbe-Versuche - mit Up- und Downsampling) _____ - 84 -

Anlage 109: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (StreetProbe-Versuche - mit Up- und Downsampling) _____ - 85 -

Auswertung der StreetProbe-Versuche - $\Delta v \geq 0,5$ km/h

Anlage 110: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (StreetProbe-Versuche - mit Up- und Downsampling) _____ - 86 -

Anlage 111: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 5 ms (StreetProbe-Versuche - mit Up- und Downsampling) _____ - 87 -

Anlage 112: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (StreetProbe-Versuche - mit Up- und Downsampling) _____ - 88 -

Auswertung der StreetProbe-Versuche - $\Delta v \geq 0,25$ km/h

Anlage 113: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (StreetProbe-Versuche - mit Up- und Downsampling) _____ - 89 -

Anlage 114: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (StreetProbe-Versuche - mit Up- und Downsampling) _____ - 90 -

Fehlerbetrachtung der Versuche mit dem Biofidel-Dummy - $\Delta v \geq 0,8$ km/h innerhalb von 20 ms in Längsrichtung - Unfalldatenspeicher

Anlage 115: Verteilung der absoluten Abweichung nach der Interpolation der UDS-Daten in Längsrichtung bezogen auf das Maximum der nicht interpolierten Daten bei den Versuchen mit dem Biofidel-Dummy _____ - 91 -

Anlage 116: Verteilung der relativen Abweichung nach der Interpolation der UDS-Daten in Längsrichtung bezogen auf das Maximum der nicht interpolierten Daten bei den Versuchen mit dem Biofidel-Dummy _____ - 91 -

Anlage 117: Verteilung der relativen Abweichung nach der Interpolation der UDS-Daten in Längsrichtung bezogen auf den Schwellwert von 0,8 km/h bei den Versuchen mit dem Biofidel-Dummy _____ - 92 -

Anlage 118: Darstellung der maximalen absoluten Abweichung der Maxima der Geschwindigkeitsänderung basierend auf der Längsbeschleunigung des UDS - Versuch 7-G-01 _____ - 93 -

Anlage 119: Darstellung der maximalen relativen Abweichung der Maxima der Geschwindigkeitsänderung basierend auf der Längsbeschleunigung des UDS - Versuch 10-UO-01 _____ - 94 -

Anlage 120: Darstellung der maximalen absoluten und relativen Abweichung der Zeitreihe der Geschwindigkeitsänderung basierend auf der Längsbeschleunigung des UDS - Versuch 22-GA-01 _____ - 95 -

Fehlerbetrachtung der Versuche mit dem Biofidel-Dummy - $\Delta v \geq 0,8$ km/h innerhalb von 20 ms in Längsrichtung - Dewesoft

Anlage 121: Verteilung der absoluten Abweichung nach der Dezimation der Dewesoft-Daten in Längsrichtung bezogen auf das Maximum der nicht dezimierten Daten bei den Versuchen mit dem Biofidel-Dummy _____ - 97 -

Anlage 122: Verteilung der relativen Abweichung nach der Dezimation der Dewesoft-Daten in Längsrichtung bezogen auf das Maximum der nicht dezimierten Daten bei den Versuchen mit dem Biofidel-Dummy _____ - 97 -

Anlage 123: Verteilung der relativen Abweichung nach der Dezimation der Dewesoft-Daten in Längsrichtung bezogen auf den Schwellwert von 0,8 km/h bei den Versuchen mit dem Biofidel-Dummy _____ - 98 -

Anlage 124: Darstellung der maximalen absoluten Abweichung der Maxima der Geschwindigkeitsänderung basierend auf der Längsbeschleunigung des Dewesoft-Systems - Versuch 33-U-02 _____ - 99 -

Anlage 125: Darstellung der maximalen relativen Abweichung der Maxima der Geschwindigkeitsänderung basierend auf der Längsbeschleunigung des Dewesoft-Systems - Versuch 33-U-01 _____ - 100 -

Anlage 126: Darstellung der maximalen absoluten Abweichung der Zeitreihe der Geschwindigkeitsänderung basierend auf der Längsbeschleunigung des Dewesoft-Systems - Versuch 33-U-02 _____ - 101 -

Anlage 127: Darstellung der maximalen relativen Abweichung der Zeitreihe der Geschwindigkeitsänderung basierend auf der Längsbeschleunigung des Dewesoft-Systems - Versuch 33-U-01 _____ - 102 -

Fehlerbetrachtung der Datensätze der Polizei Berlin von 2016 - $v \geq 0,8$ km/h innerhalb von 20 ms in Längsrichtung - Unfalldatenspeicher

Anlage 128: Verteilung der absoluten Abweichung nach der Interpolation der UDS-Daten in Längsrichtung bezogen auf das Maximum der nicht interpolierten Daten der Datensätze der Polizei Berlin von 2016 _____ - 103 -

Anlage 129: Verteilung der absoluten Abweichung nach der Interpolation der UDS-Daten in Längsrichtung bezogen auf das Maximum der nicht interpolierten Daten der Datensätze der Polizei Berlin von 2016 ohne die Datensätze, welche den Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms überschreiten _____ - 103 -

Anlage 130: Verteilung der relativen Abweichung nach der Interpolation der UDS-Daten in Längsrichtung bezogen auf das Maximum der nicht interpolierten Daten der Datensätze der Polizei Berlin von 2016 _____ - 104 -

Anlage 131: Verteilung der relativen Abweichung nach der Interpolation der UDS-Daten in Längsrichtung bezogen auf das Maximum der nicht interpolierten Daten der Datensätze der Polizei Berlin von 2016 ohne die Datensätze, welche den Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms überschreiten _____ - 104 -

Anlagenverzeichnis

Anlage 132: Verteilung der relativen Abweichung nach der Interpolation der UDS-Daten in Längsrichtung bezogen auf den Schwellwert von 0,8 km/h der Datensätze der Polizei Berlin von 2016 _____ - 105 -

Anlage 133: Verteilung der relativen Abweichung nach der Interpolation der UDS-Daten in Längsrichtung bezogen auf den Schwellwert von 0,8 km/h der Datensätze der Polizei Berlin von 2016 ohne die Datensätze, welche den Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms überschreiten _____ - 105 -

Anlagen

Datenelement	Bedingung für die Anforderung ⁽¹⁾	Intervall/ Uhrzeit der Aufzeichnung ⁽²⁾ (bezogen auf den Zeitpunkt Null)	Datenabstrakte (Abtastungen pro Sekunde)	Mindestbereich	Genauigkeit ⁽³⁾	Auflösung	Aufgezeichnete Ereignisse ⁽⁴⁾
Delta-V an der Längsachse	Obligatorisch — nicht erforderlich, wenn die Längsbeschleunigung bei ≥ 500 Hz über einen ausreichenden Bereich und mit ausreichender Auflösung aufgezeichnet wird, um Delta-V mit der erforderlichen Genauigkeit berechnen zu können	0–250 ms oder 0 bis zum Ereignis-Endzeitpunkt plus 30 ms, je nachdem, was kürzer ist	100	-100 km/h bis +100 km/h	± 10 %	1 km/h	Planar
Maximales Delta-V an der Längsachse	Obligatorisch — nicht erforderlich, wenn die Längsbeschleunigung bei ≥ 500 Hz aufgezeichnet wird	0–300 ms oder 0 bis zum Ereignis-Endzeitpunkt plus 30 ms, je nachdem, was kürzer ist	Entfällt	-100 km/h bis +100 km/h	± 10 %	1 km/h	Planar
Zeit, maximales Delta-V an der Längsachse	Obligatorisch — nicht erforderlich, wenn die Längsbeschleunigung bei ≥ 500 Hz aufgezeichnet wird	0–300 ms oder 0 bis zum Ereignis-Endzeitpunkt plus 30 ms, je nachdem, was kürzer ist	Entfällt	0–300 ms oder 0 bis zum Ereignis-Endzeitpunkt plus 30 ms, je nachdem, was kürzer ist	± 3 ms	2,5 ms	Planar
Geschwindigkeit, Fahrzeug angezeigt	Obligatorisch	-5,0 bis 0 s	2	0 km/h bis 250 km/h	± 1 km/h	1 km/h	Planar VRU Überschlag
Motordrossel, % voll (oder Gaspedal, % voll)	Obligatorisch	-5,0 bis 0 s	2	0 bis 100 %	± 5 %	1 %	Planar Überschlag VRU
Betriebsbremse, ein/aus	Obligatorisch	-5,0 bis 0 s	2	Ein oder Aus	Entfällt	Ein oder Aus	Planar VRU Überschlag

Anlage 1: Tabelle an Parametern des Ereignisdatenspeichers nach UN/ECE-Regelung 160 - Teil 1

Anlagen

Datenelement	Bedingung für die Anforderung ⁽¹⁾	Intervall/ Uhrzeit der Aufzeichnung ⁽²⁾ (bezogen auf den Zeitpunkt Null)	Datenabtastrate (Abtastungen pro Sekunde)	Mindestbereich	Genauigkeit ⁽³⁾	Auflösung	Aufgezeichnete Ereignisse ⁽⁴⁾
Zündzyklus, Unfall	Obligatorisch	-1,0 s	Entfällt	0 bis 60 000	±1 Zyklus	1 Zyklus	Planar VRU Überschlag
Zündzyklus, Herunterladen	Obligatorisch	Zum Zeitpunkt des Herunterladens ⁽⁵⁾	Entfällt	0 bis 60 000	±1 Zyklus	1 Zyklus	Planar VRU Überschlag
Sicherheitsgurtstatus, Fahrerseite	Obligatorisch	-1,0 s	Entfällt	Angelegt, nicht angelegt	Entfällt	Angelegt, nicht angelegt	Planar Überschlag
Airbag-Warnleuchte ⁽⁶⁾	Obligatorisch	-1,0 s	Entfällt	Ein oder Aus	Entfällt	Ein oder Aus	Planar Überschlag
Auslösung des Front-Airbags, Zeit bis zum Auslösen (im Falle eines einstufigen Airbag-Systems) oder Zeit bis zur ersten Auslösung (im Falle eines mehrstufigen Airbag-Systems), Fahrerseite	Obligatorisch	Ereignis	Entfällt	0 bis 250 ms	±2 ms	1 ms	Planar
Auslösung des Front-Airbags, Zeit bis zum Auslösen (im Falle eines einstufigen Airbag-Systems) oder Zeit bis zur ersten Auslösung (im Falle eines mehrstufigen Airbag-Systems), Beifahrerseite	Obligatorisch	Ereignis	Entfällt	0 bis 250 ms	±2 ms	1 ms	Planar
Unfall mit mehreren Ereignissen, Anzahl der Ereignisse	Wenn aufgezeichnet ⁽⁷⁾	Ereignis	Entfällt	1 oder mehr	Entfällt	1 oder mehr	Planar VRU Überschlag

Anlage 2: Tabelle an Parametern des Ereignisdatenspeichers nach UN/ECE-Regelung 160 - Teil 2

Anlagen

Datenelement	Bedingung für die Anforderung (1)	Intervall/ Uhrzeit der Aufzeichnung (2) (bezogen auf den Zeitpunkt Null)	Datenabstrakte (Abtastungen pro Sekunde)	Mindestbereich	Genauigkeit (3)	Auflösung	Aufgezeichnete Ereignisse (4)
Zeit von Ereignis 1 bis Ereignis 2	Obligatorisch	Nach Bedarf	Entfällt	0 bis 5,0 s	±0,1 s	0,1 s	Planar Überschlag
Vollständiger Datensatz aufgezeichnet (ja, nein)	Obligatorisch	Nach anderen Daten	Entfällt	Ja oder Nein	Entfällt	Ja oder Nein	Planar VRU Überschlag
Querbeschleunigung (nach dem Unfall)	Wenn aufgezeichnet	0–250 ms oder 0 bis zum Ereignis-Endzeitpunkt plus 30 ms, je nachdem, was kürzer ist	500	-50 bis +50 g	+/- 10 %	1 g	Planar Überschlag
Längsbeschleunigung (nach dem Unfall)	Wenn aufgezeichnet	0–250 ms oder 0 bis zum Ereignis-Endzeitpunkt plus 30 ms, je nachdem, was kürzer ist	500	-50 bis +50 g	+/- 10 %	1 g	Planar
Normalbeschleunigung (nach dem Unfall)	Wenn aufgezeichnet	-1,0 bis 5,0 s (5)	10 Hz	-5 g bis +5 g	±10 %	0,5 g	Überschlag
Delta-V an der Querachse	Obligatorisch — nicht erforderlich, wenn die Querbeschleunigung bei ≥ 500 Hz über einen ausreichenden Bereich und mit ausreichender Auflösung aufgezeichnet wird, um Delta-V mit der erforderlichen Genauigkeit berechnen zu können	0–250 ms oder 0 bis zum Ereignis-Endzeitpunkt plus 30 ms, je nachdem, was kürzer ist	100	-100 km/h bis +100 km/h	±10 %	1 km/h	Planar
Maximales Delta-V an der Querachse	Obligatorisch — nicht erforderlich, wenn die Querbeschleunigung bei ≥ 500 Hz aufgezeichnet wird	0–300 ms oder 0 bis zum Ereignis-Endzeitpunkt plus 30 ms, je nachdem, was kürzer ist	Entfällt	-100 km/h bis +100 km/h	±10 %	1 km/h	Planar

Anlage 3: Tabelle an Parametern des Ereignisdatenspeichers nach UN/ECE-Regelung 160 - Teil 3

Anlagen

Datenelement	Bedingung für die Anforderung ⁽¹⁾	Intervall/ Uhrzeit der Aufzeichnung ⁽²⁾ (bezogen auf den Zeitpunkt Null)	Datenabtastrate (Abtastungen pro Sekunde)	Mindestbereich	Genauigkeit ⁽³⁾	Auflösung	Aufgezeichnete Ereignisse ⁽⁴⁾
Zeit maximales Delta-V an der Querachse	Obligatorisch — nicht erforderlich, wenn die Querbeschleunigung bei ≥ 500 Hz aufgezeichnet wird	0–300 ms oder 0 bis zum Ereignis-Endzeitpunkt plus 30 ms, je nachdem, was kürzer ist	Entfällt	0–300 ms oder 0 bis zum Ereignis-Endzeitpunkt plus 30 ms, je nachdem, was kürzer ist	± 3 ms	2,5 ms	Planar
Zeit, maximale Delta-V-Resultante	Obligatorisch — nicht erforderlich, wenn die entsprechende Beschleunigung bei ≥ 500 Hz aufgezeichnet wird	0–300 ms oder 0 bis zum Ereignis-Endzeitpunkt plus 30 ms, je nachdem, was kürzer ist	Entfällt	0–300 ms oder 0 bis zum Ereignis-Endzeitpunkt plus 30 ms, je nachdem, was kürzer ist	± 3 ms	2,5 ms	Planar
Motordrehzahl (U/min)	Obligatorisch	-5,0 bis 0 s	2	0 bis 10 000 U/min	± 100 U/min ⁽⁵⁾	100 U/min	Planar Überschlag
Rollwinkel des Fahrzeugs	Wenn aufgezeichnet	-1,0 bis 5,0 s ⁽⁶⁾	10	-1 080 Grad bis +1 080 Grad	± 10 %	10 Grad	Überschlag
ABS-Aktivität	Obligatorisch	-5,0 bis 0 s	2	Störung, Aktiv, Zwischenschaltung ⁽⁷⁾	Entfällt	Störung, Aktiv, Zwischenschaltung ⁽¹¹⁾	Planar VRU Überschlag
Fahrdynamikregelung	Obligatorisch	-5,0 bis 0 s	2	Störung, Ein, Aus, Zwischenschaltung ⁽¹¹⁾	Entfällt	Störung, Ein, Aus, Zwischenschaltung ⁽¹¹⁾	Planar VRU Überschlag
Lenkwinkleingabe	Obligatorisch	-5,0 bis 0 s	2	-250 Grad im Uhrzeigersinn bis +250 Grad gegen den Uhrzeigersinn	± 5 %	± 1 %	Planar Überschlag VRU
Sicherheitsgurtstatus, Beifahrerseite	Obligatorisch	-1,0 s	Entfällt	Angelegt, nicht angelegt	Entfällt	Angelegt, nicht angelegt	Planar Überschlag

Anlage 4: Tabelle an Parametern des Ereignisdatenspeichers nach UN/ECE-Regelung 160 - Teil 4

Anlagen

Datenelement	Bedingung für die Anforderung ⁽¹⁾	Intervall/ Uhrzeit der Aufzeichnung ⁽²⁾ (bezogen auf den Zeitpunkt Null)	Datenabtastrate (Abtastungen pro Sekunde)	Mindestbereich	Genauigkeit ⁽³⁾	Auflösung	Aufgezeichnete Ereignisse ⁽⁴⁾
Deaktivierungsstatus des Beifahrer-Airbags	Obligatorisch	-1,0 s	Entfällt	Deaktiviert oder nicht deaktiviert	Entfällt	Deaktiviert oder nicht deaktiviert	Planar Überschlag
Auslösung des Front-Airbags, Zeit bis zur n-ten Stufe, Fahrerseite ⁽⁵⁾	Obligatorisch bei Ausrüstung mit einem mehrstufigen Front-Airbag-System auf der Fahrerseite	Ereignis	Entfällt	0 bis 250 ms	±2 ms	1 ms	Planar
Auslösung des Front-Airbags, Zeit bis zur n-ten Stufe, Beifahrerseite ⁽¹¹⁾	Obligatorisch bei Ausrüstung mit einem mehrstufigen Front-Airbag-System auf der Beifahrerseite	Ereignis	Entfällt	0 bis 250 ms	±2 ms	1 ms	Planar
Auslösung des Seiten-Airbags, Zeit bis zum Auslösen, Fahrerseite	Obligatorisch	Ereignis	Entfällt	0 bis 250 ms	±2 ms	1 ms	Planar
Auslösung des Seiten-Airbags, Zeit bis zum Auslösen, Beifahrerseite	Obligatorisch	Ereignis	Entfällt	0 bis 250 ms	±2 ms	1 ms	Planar
Auslösung des Kopf-Airbags, Zeit bis zum Auslösen, Fahrerseite	Obligatorisch	Ereignis	Entfällt	0 bis 250 ms	±2 ms	1 ms	Planar Überschlag
Auslösung des Kopf-Airbags, Zeit bis zum Auslösen, Beifahrerseite	Obligatorisch	Ereignis	Entfällt	0 bis 250 ms	±2 ms	1 ms	Planar Überschlag

Anlage 5: Tabelle an Parametern des Ereignisdatenspeichers nach UN/ECE-Regelung 160 - Teil 5

Anlagen

Datenelement	Bedingung für die Anforderung ⁽¹⁾	Intervall/ Uhrzeit der Aufzeichnung ⁽²⁾ (bezogen auf den Zeitpunkt Null)	Datenabstrakte (Abtastungen pro Sekunde)	Mindestbereich	Genauigkeit ⁽³⁾	Auflösung	Aufgezeichnete Ereignisse ⁽⁴⁾
Auslösung des Gurtstraffers, Zeit bis zum Auslösen, Fahrerseite	Obligatorisch	Ereignis	Entfällt	0 bis 250 ms	±2 ms	1 ms	Planar Überschlag
Auslösung des Gurtstraffers, Zeit bis zum Auslösen, Beifahrerseite	Obligatorisch	Ereignis	Entfällt	0 bis 250 ms	±2 ms	1 ms	Planar Überschlag
Status des Sitzschienenpositionsschalters, vorderste Position, Fahrerseite	Obligatorisch, wenn das Fahrzeug mit einem solchen Schalter ausgerüstet ist und dieser bei der Auslöseentscheidung eine Rolle spielt	-1,0 s	Entfällt	Ja oder Nein	Entfällt	Ja oder Nein	Planar Überschlag
Status des Sitzschienenpositionsschalters, vorderste Position, Beifahrerseite	Obligatorisch, wenn das Fahrzeug mit einem solchen Schalter ausgerüstet ist und dieser bei der Auslöseentscheidung eine Rolle spielt	-1,0 s	Entfällt	Ja oder Nein	Entfällt	Ja oder Nein	Planar Überschlag
Insassengrößenklassifizierung, Fahrzeugführer	Wenn aufgezeichnet	-1,0 s	Entfällt	5-Perzentil-Frau oder größer	Entfällt	Ja oder Nein	Planar Überschlag
Insassengrößenklassifizierung, Beifahrer	Wenn aufgezeichnet	-1,0 s	Entfällt	Hybrid-III-Testpuppe 6 Jahre oder Q6-Testpuppe oder kleiner	Entfällt	Ja oder Nein	Planar Überschlag

⁽¹⁾ „Obligatorische“ Anforderungen unterliegen den in Absatz 1 genannten Bedingungen.

⁽²⁾ Vorunfall- und Unfalldaten sind asynchron. Die Genauigkeit der Abtastzeit für die Zeit vor einem Unfall muss -0,1 bis 1,0 Sekunden betragen (z. B. müsste T = -1 zwischen -1,1 und 0 Sekunden liegen).

⁽³⁾ Die Anforderung im Hinblick auf die Genauigkeit gilt nur innerhalb des Bereichs des physischen Sensors. Überschreiten die Messungen eines Sensors den Auslegungsbereich des Sensors, muss für das erfasste Element der Zeitpunkt angegeben werden, an dem die Messung den Auslegungsbereich des Sensors erstmals überschritten hat.

⁽⁴⁾ „Planar“ umfasst die ausgelösten Ereignisse gemäß den Absätzen 5.3.1.1, 5.3.1.2 und 5.3.1.3 und „VRU“ die ausgelösten Ereignisse gemäß Absatz 5.3.1.4.

⁽⁵⁾ Der Zündzyklus zum Zeitpunkt des Herunterladens wird nicht zum Unfallzeitpunkt, sondern während des Herunterladens aufgezeichnet.

⁽⁶⁾ Die Airbag-Warnleuchte ist die in den nationalen Airbag-Anforderungen vorgeschriebene Bereitschaftsanzeige und kann auch aufleuchten, um eine Fehlfunktion in einem anderen Teil des auslösbaren Rückhaltesystems anzuzeigen.

⁽⁷⁾ „Wenn aufgezeichnet“ bezeichnet, dass die Daten in einem nicht flüchtigen Speicher zum Zweck des späteren Herunterladens aufgezeichnet werden.

⁽⁸⁾ Kann für eine beliebige Zeitspanne aufgezeichnet werden; empfohlen wird eine Zeitspanne von -1,0 bis 5,0 s.

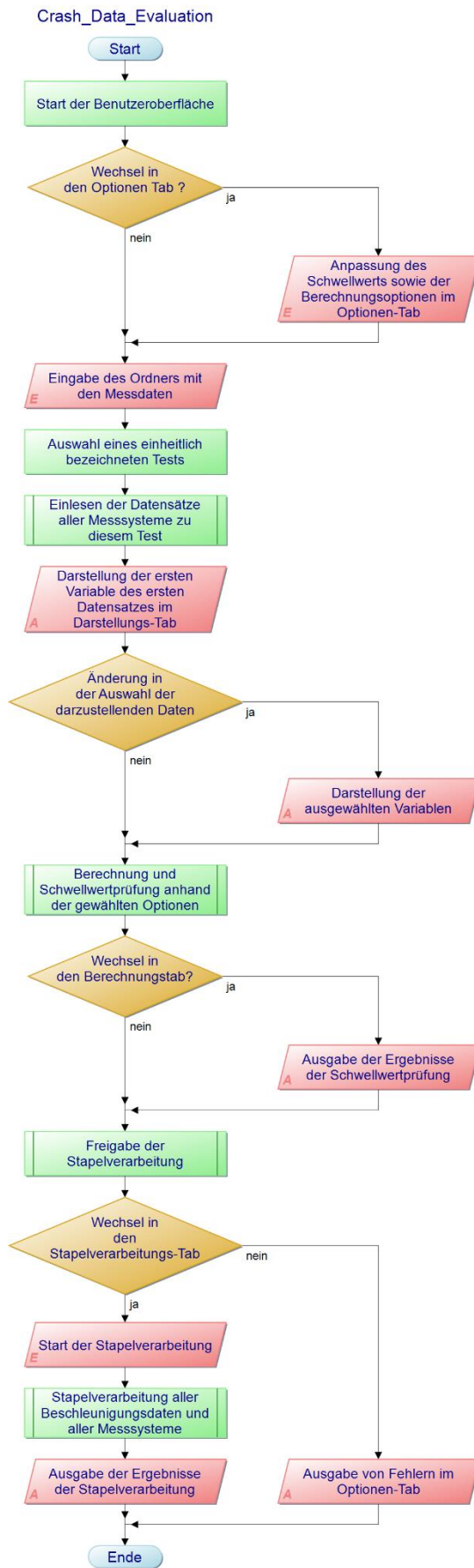
⁽⁹⁾ Diese Elemente müssen nicht die Anforderungen im Hinblick auf Genauigkeit und Auflösung in spezifizierten Aufprallprüfungen erfüllen.

⁽¹⁰⁾ Der Hersteller kann weitere Systemzustände festlegen.

⁽¹¹⁾ Dieses Element ist n-1 Mal anzuführen, d. h. einmal für jede Stufe eines mehrstufigen Airbag-Systems.

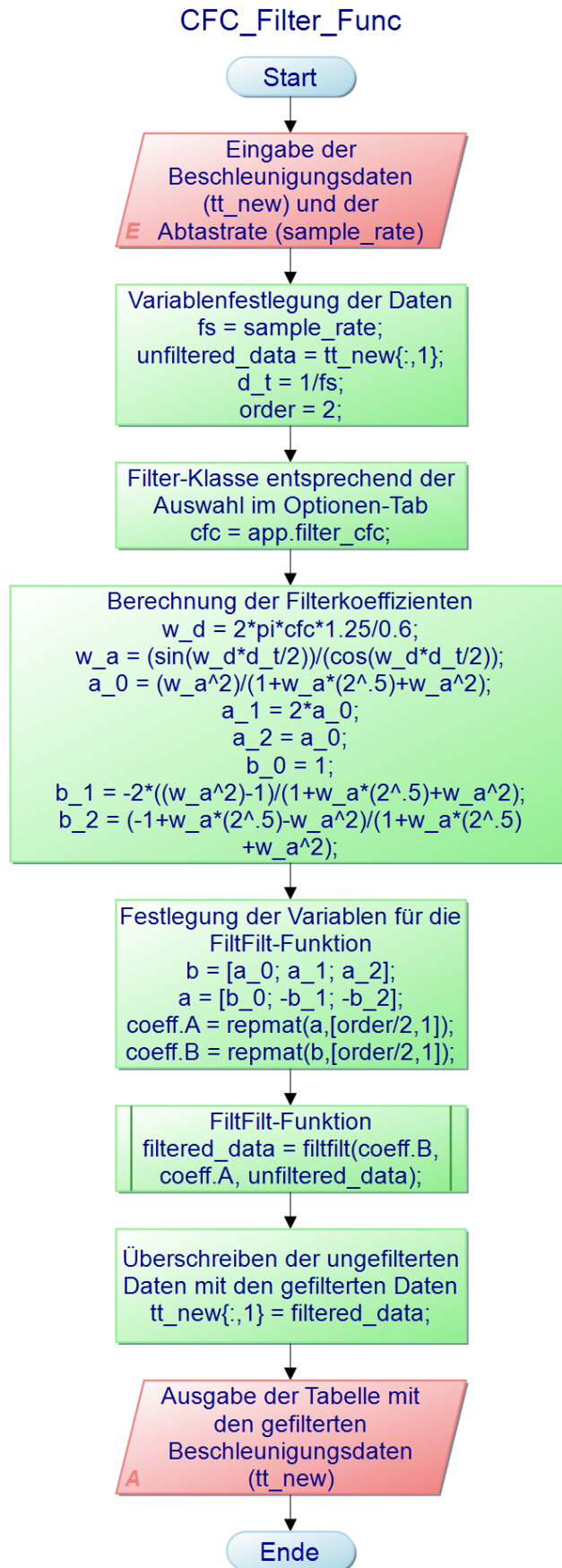
Anlage 6: Tabelle an Parametern des Ereignisdatenspeichers nach UN/ECE-Regelung 160 - Teil 6 und Fußnoten

Anlagen

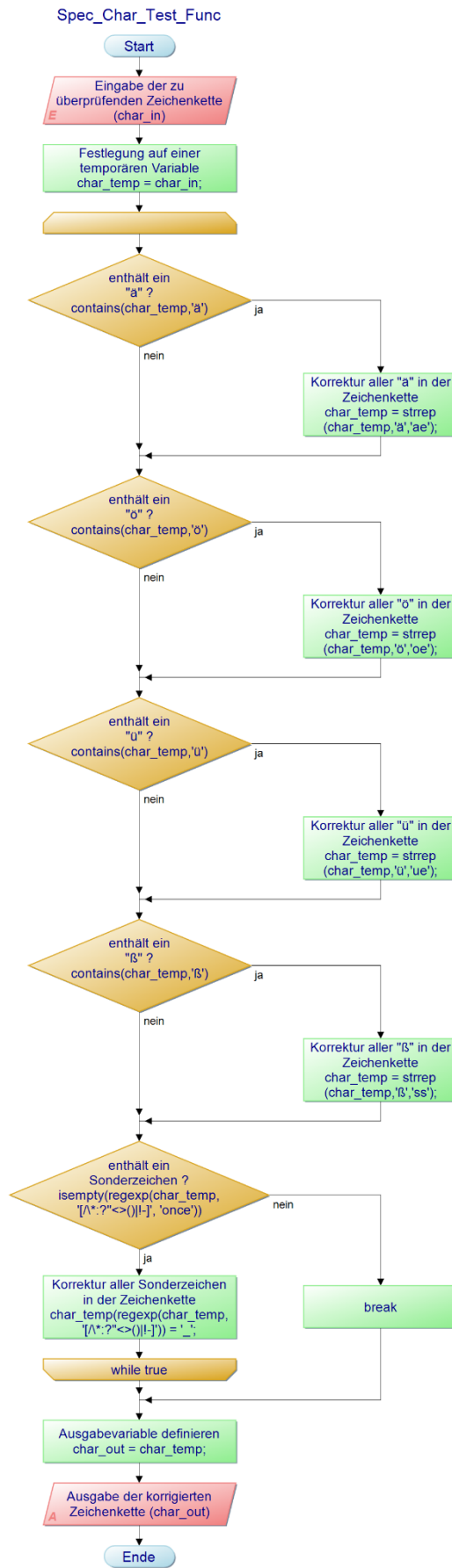


Anlage 7: Programmablaufplan - Crash Data Evaluation

Anlagen

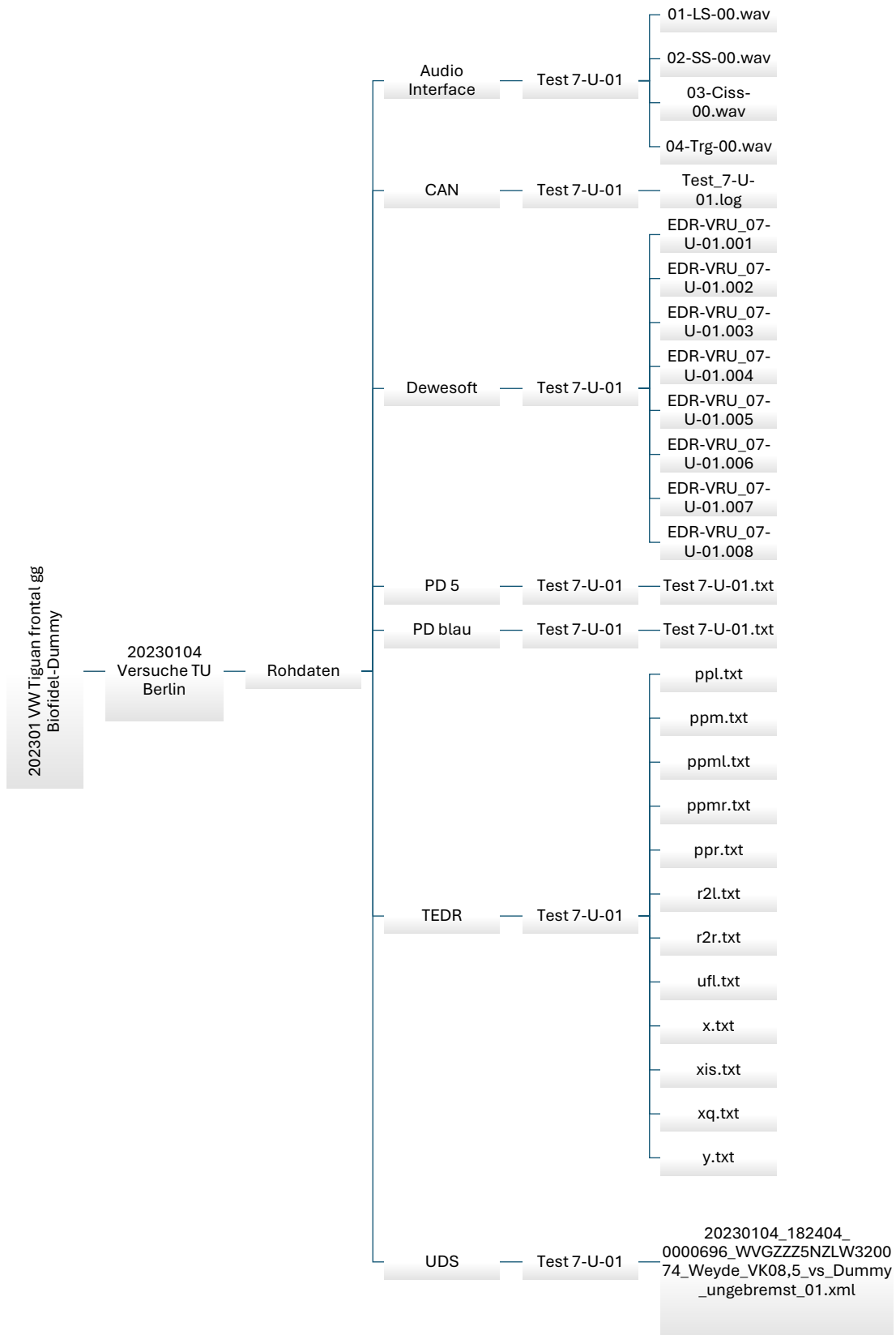


Anlagen

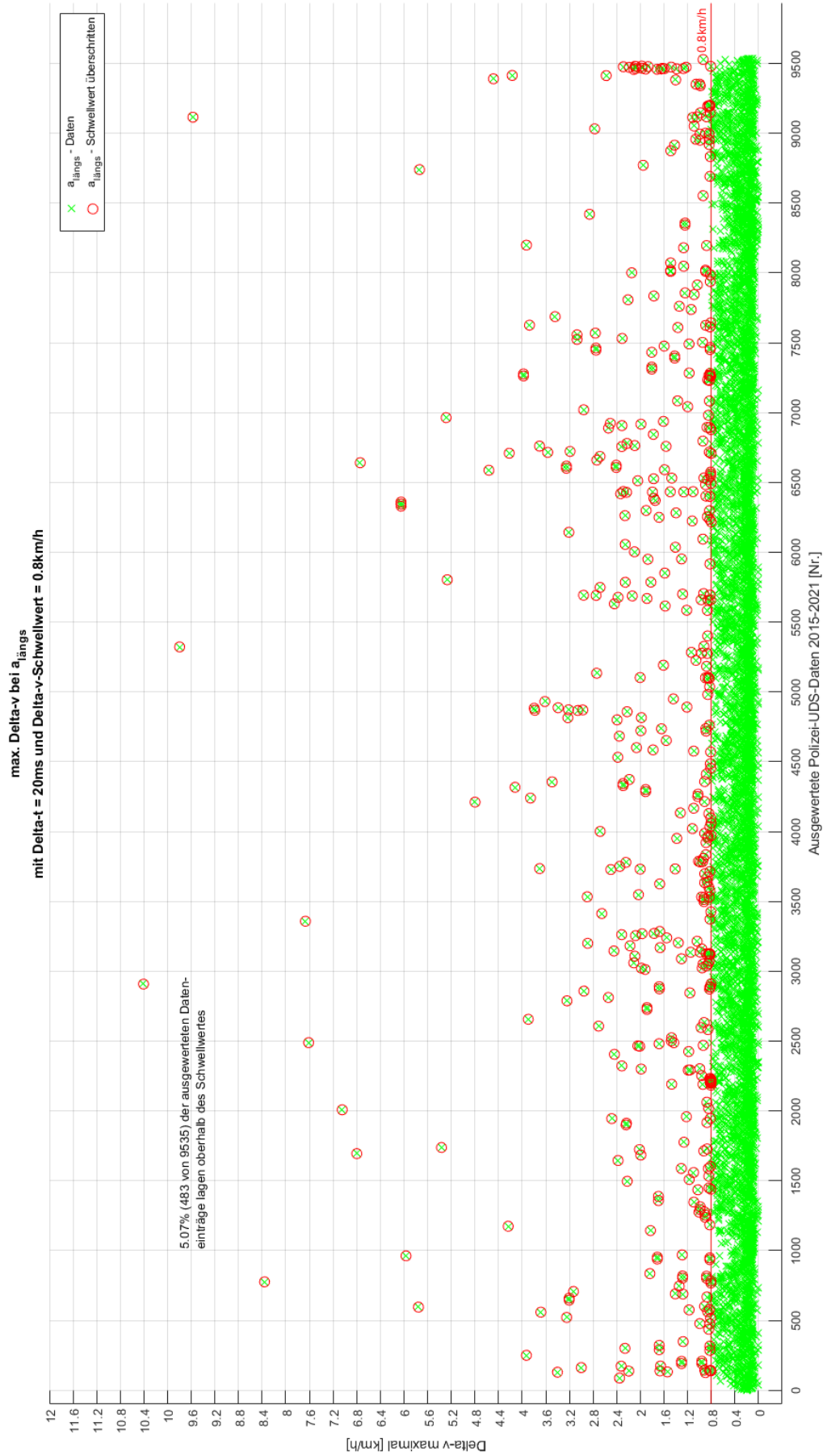


Anlage 9: Programmablaufplan - "Spec_Char_Test_Func"

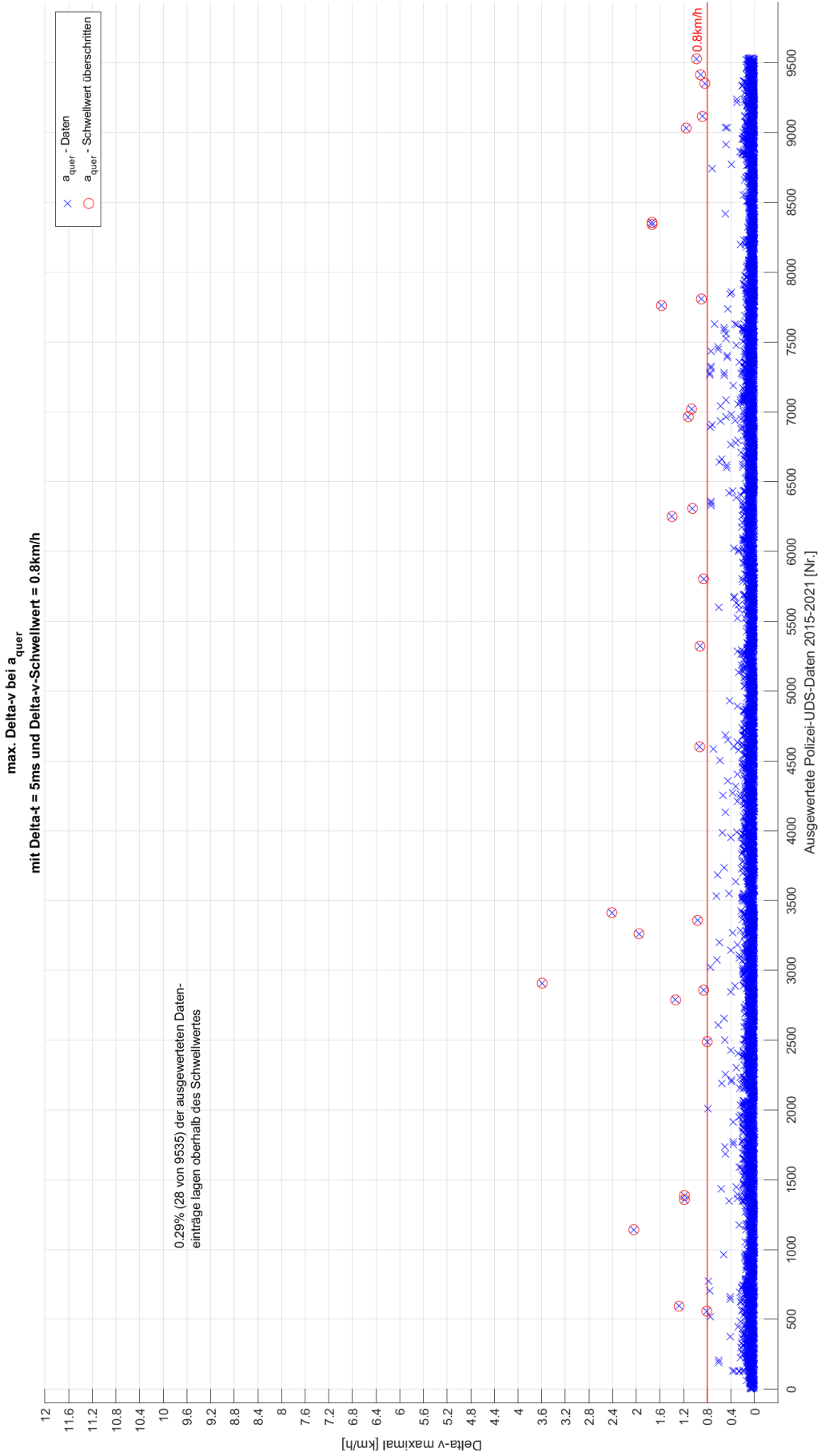
Anlagen



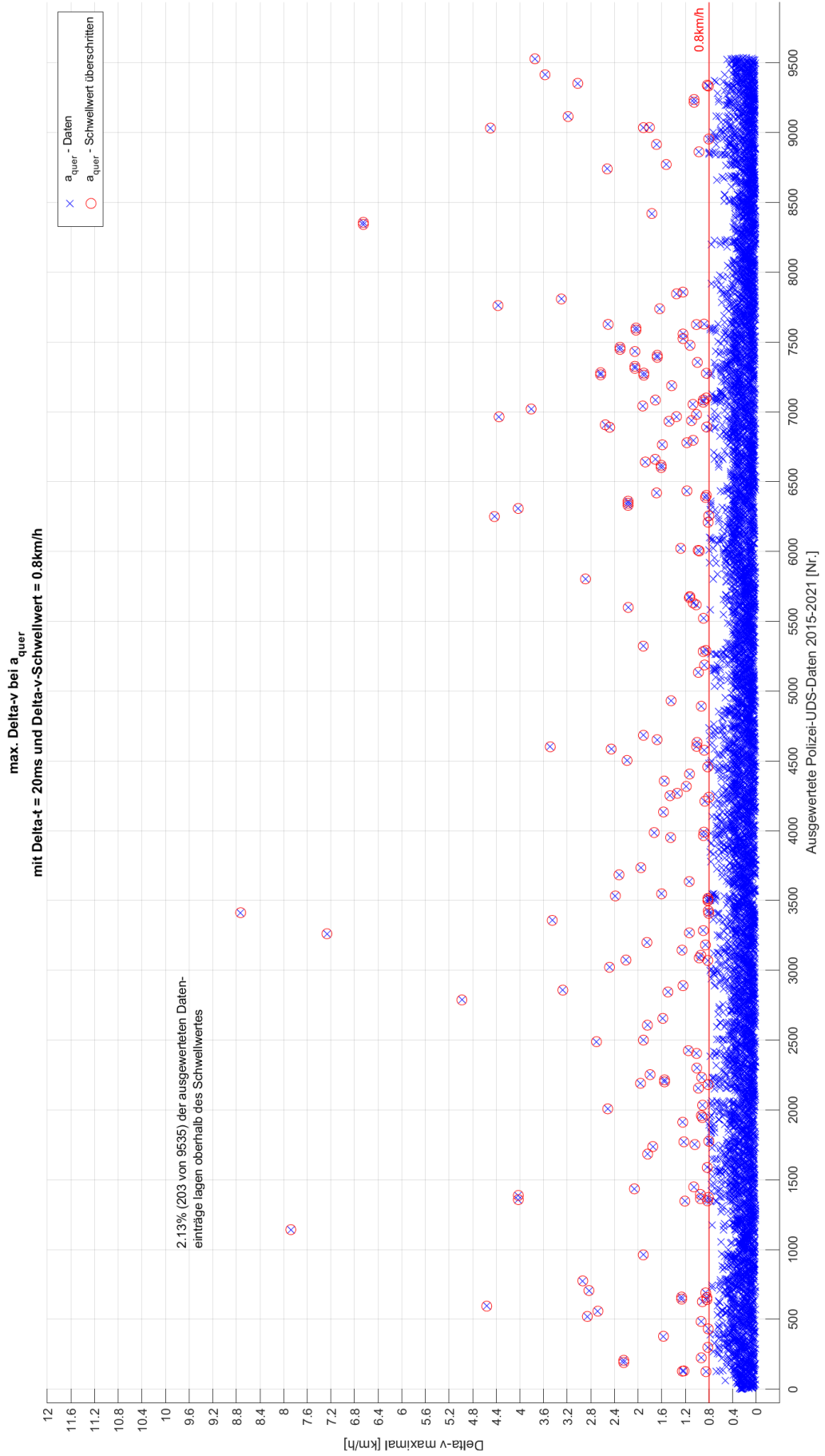
Anlage 10: Beispiel der Ordnerstruktur der Versuche mit dem Biofidel-Dummy vom 04.01.2023



Anlage 11: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

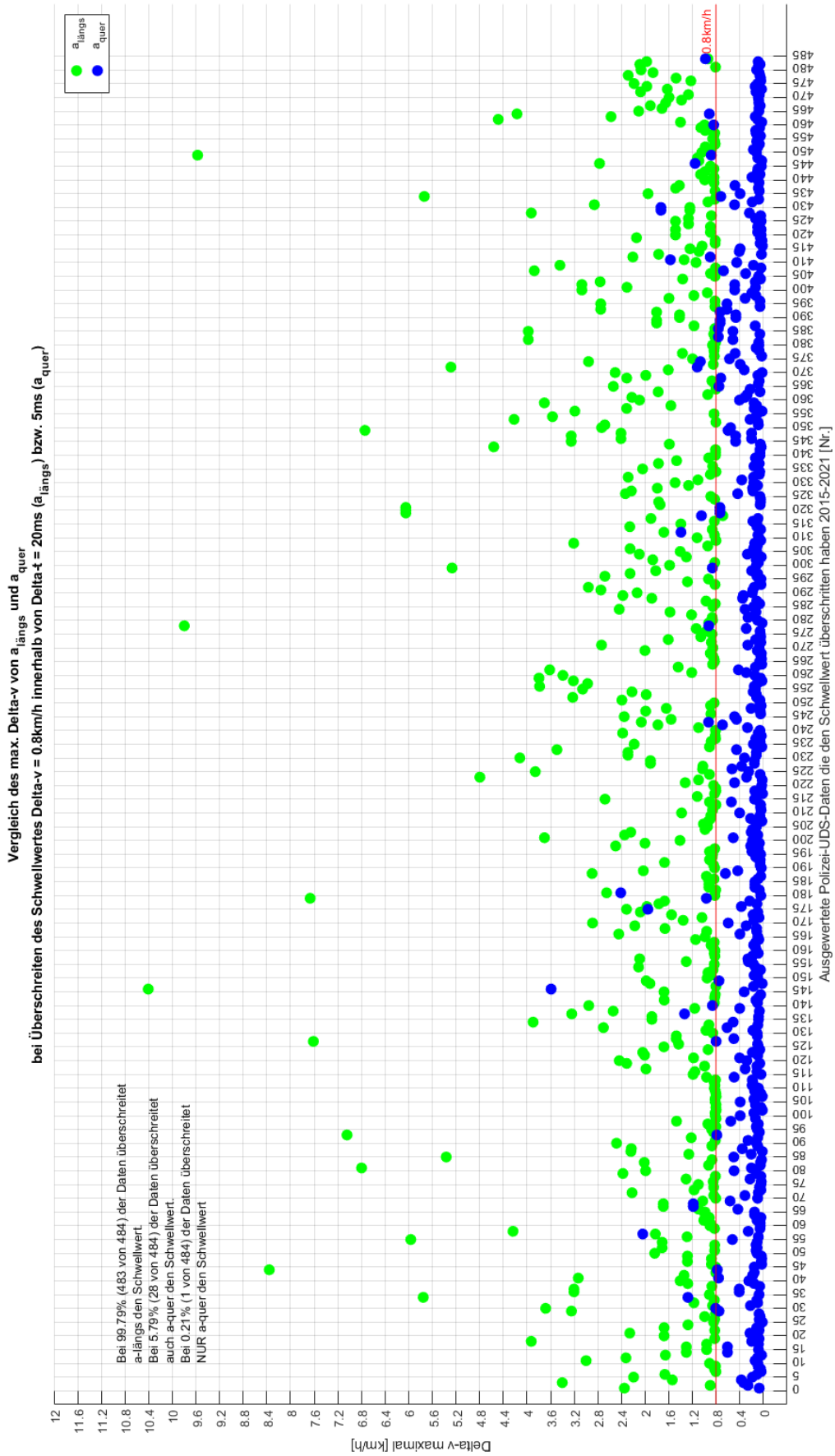


Anlage 12: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

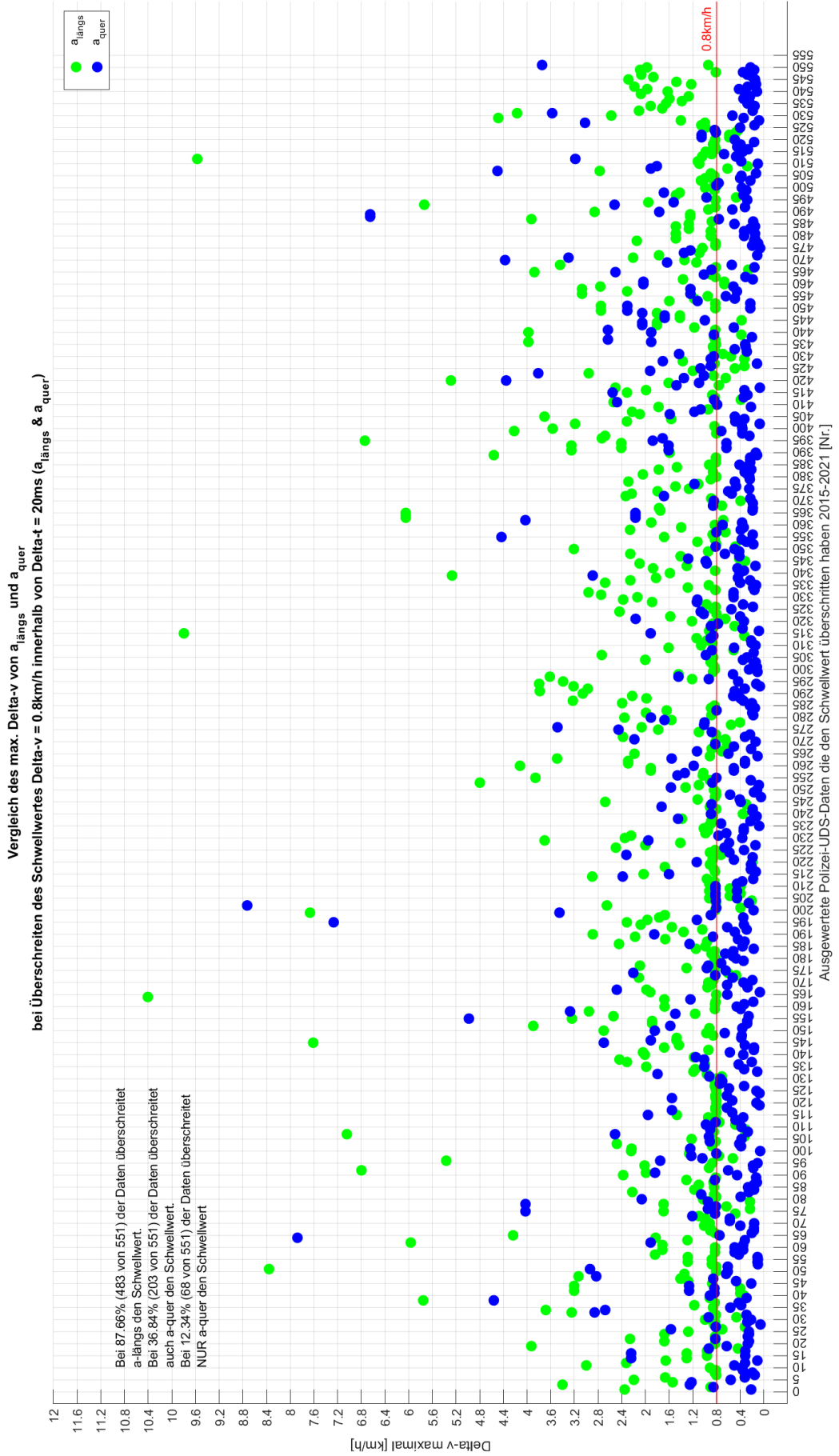


Anlage 13: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

Anlagen

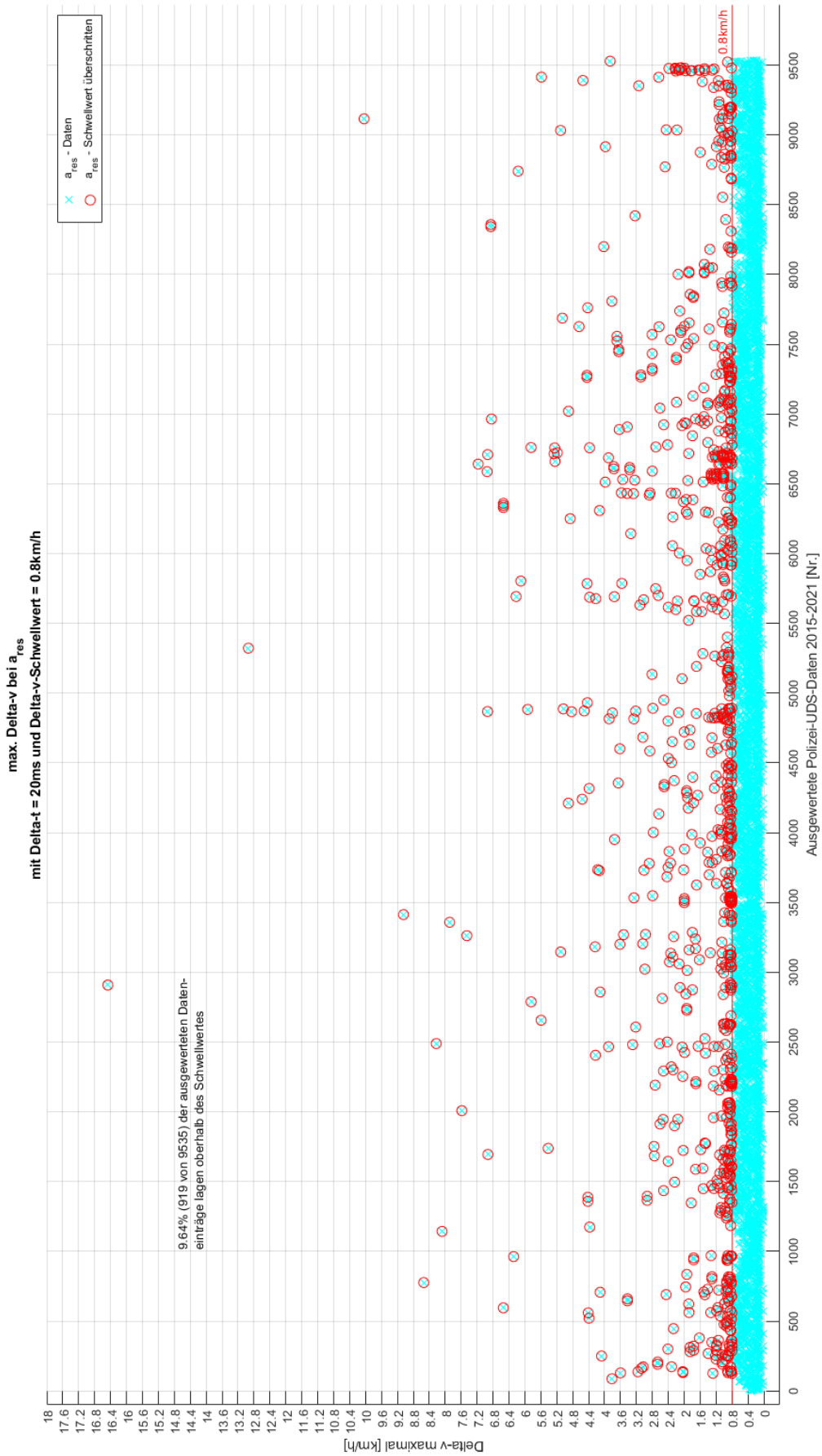


Anlage 14: Vergleich der Geschwindigkeitsänderungen in Längs- und Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20/5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)



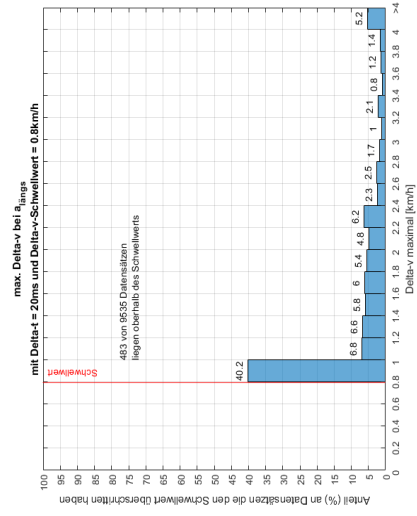
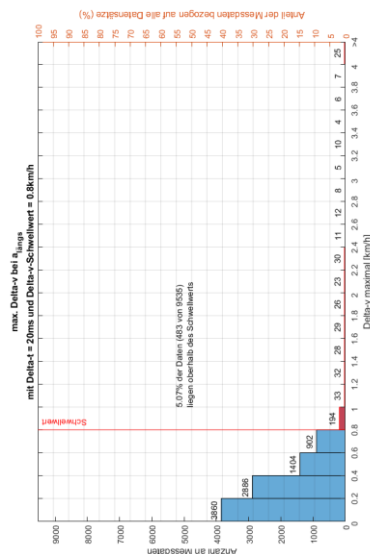
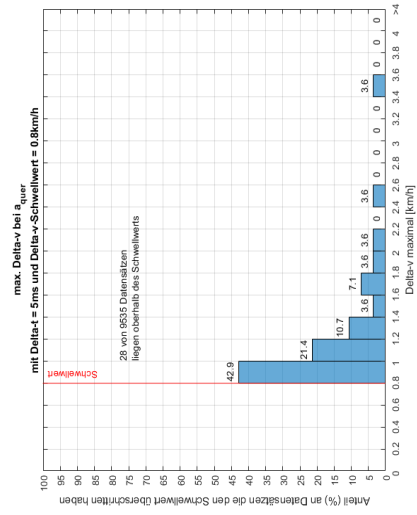
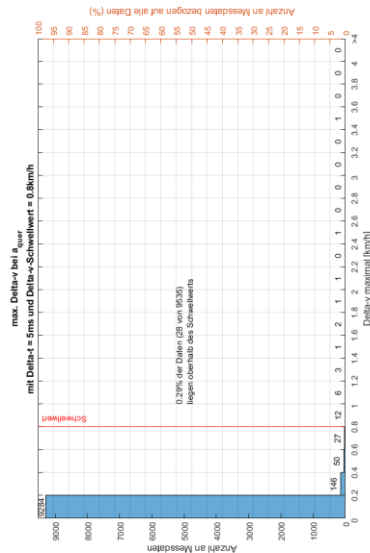
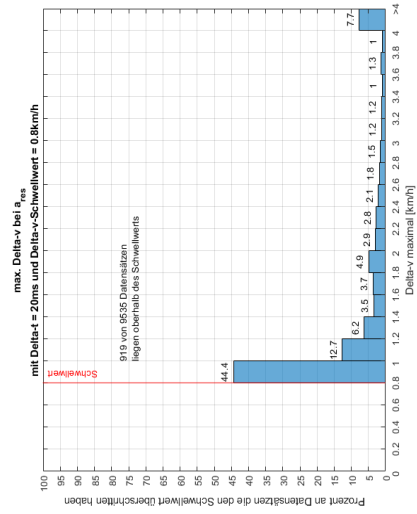
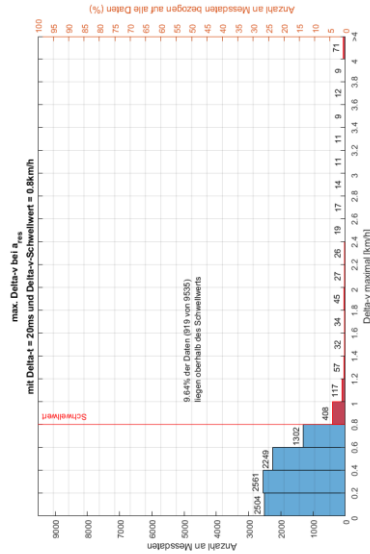
Anlage 15: Vergleich der Geschwindigkeitsänderungen in Längs- und Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

Anlagen



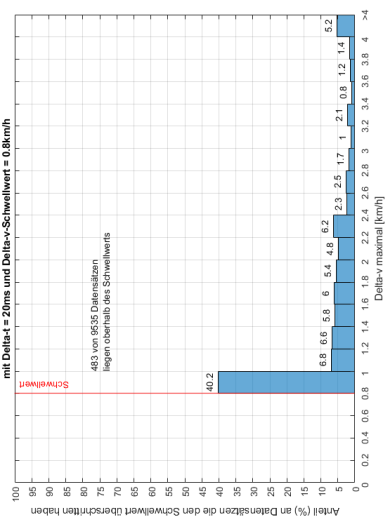
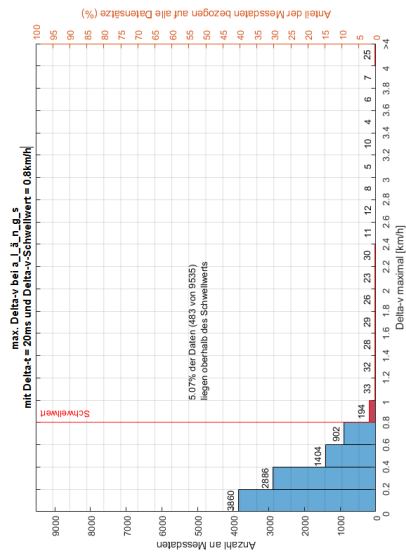
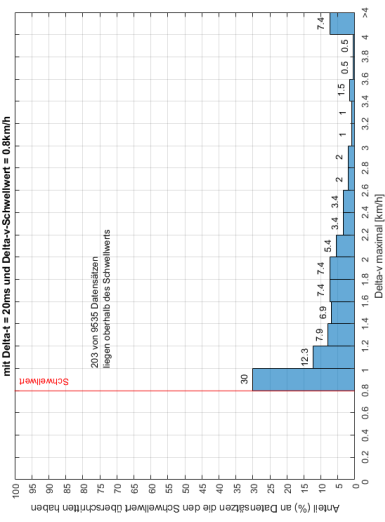
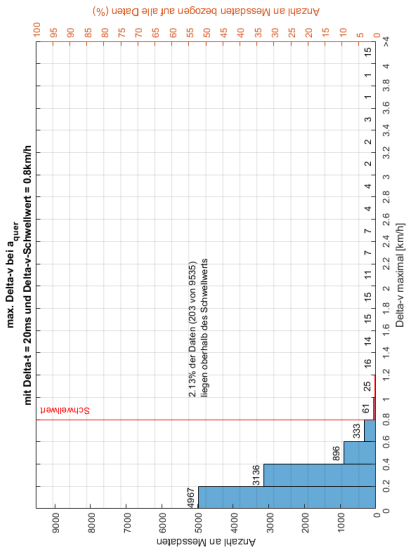
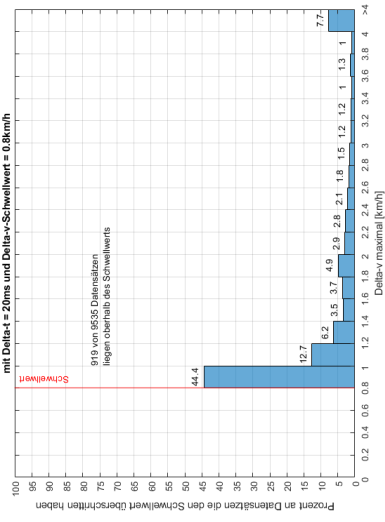
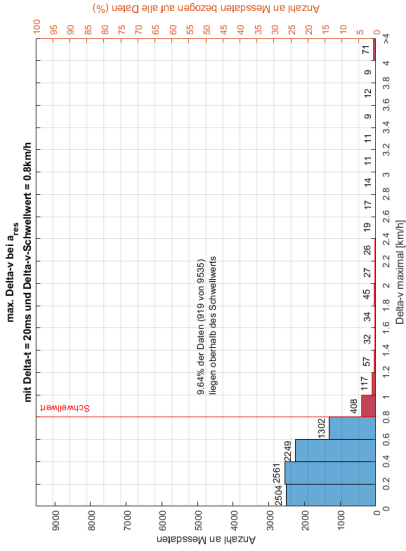
Anlage 16: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung der resultierenden Beschleunigung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

Anlagen



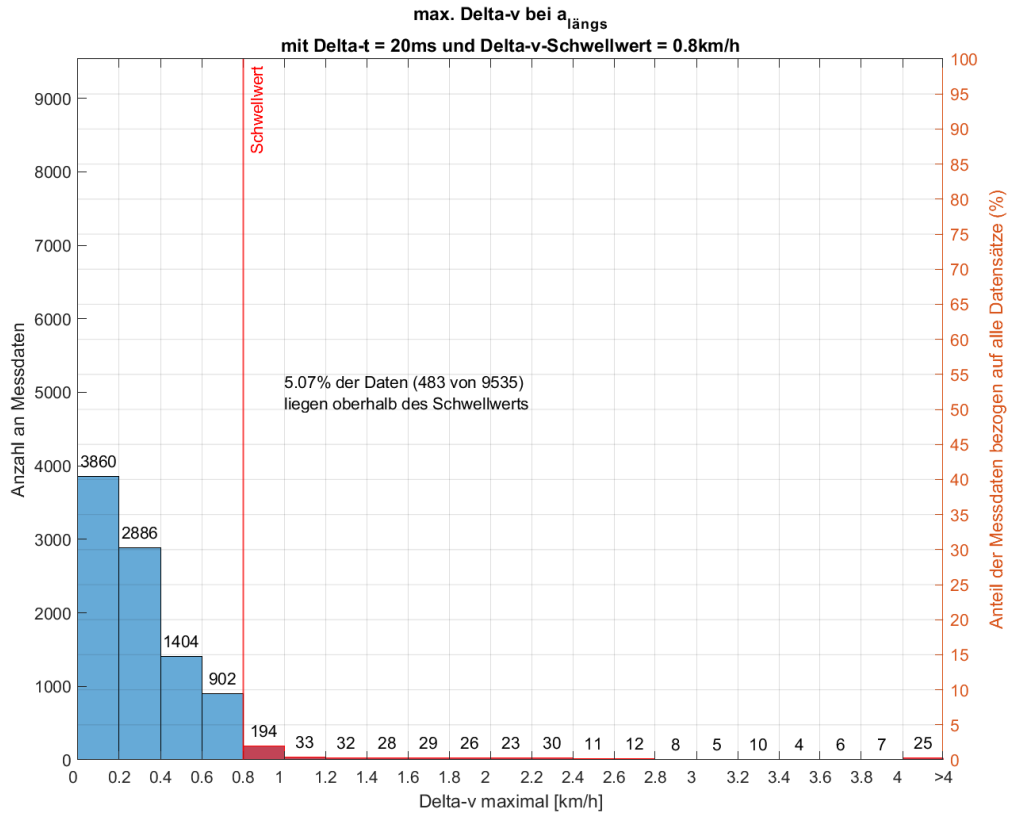
Anlage 17 & 18: Statistische Verteilung der Geschwindigkeitsänderung in Anzahl und Prozent (links) und prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,8 km/h innerhalb von 20/5 ms (rechts) (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

Anlagen

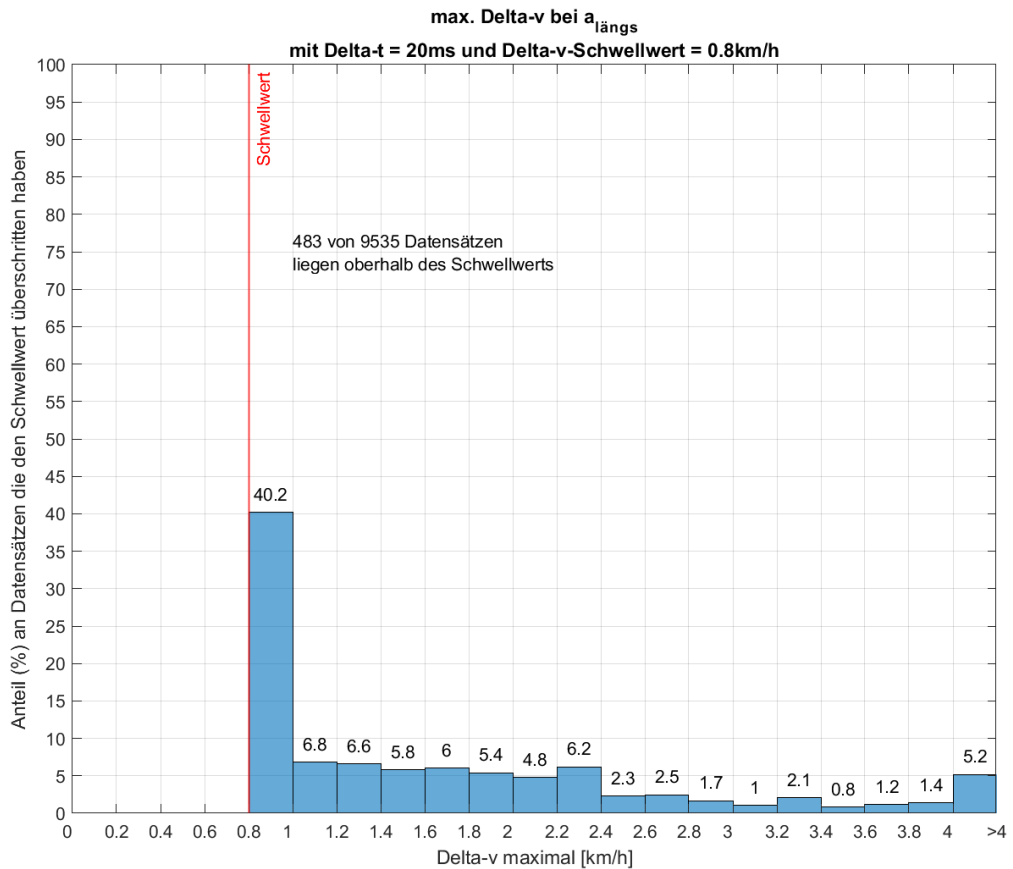


Anlage 19 & 20: Statistische Verteilung der Geschwindigkeitsänderung in Anzahl und Prozent (links) und prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (rechts) (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

Anlagen

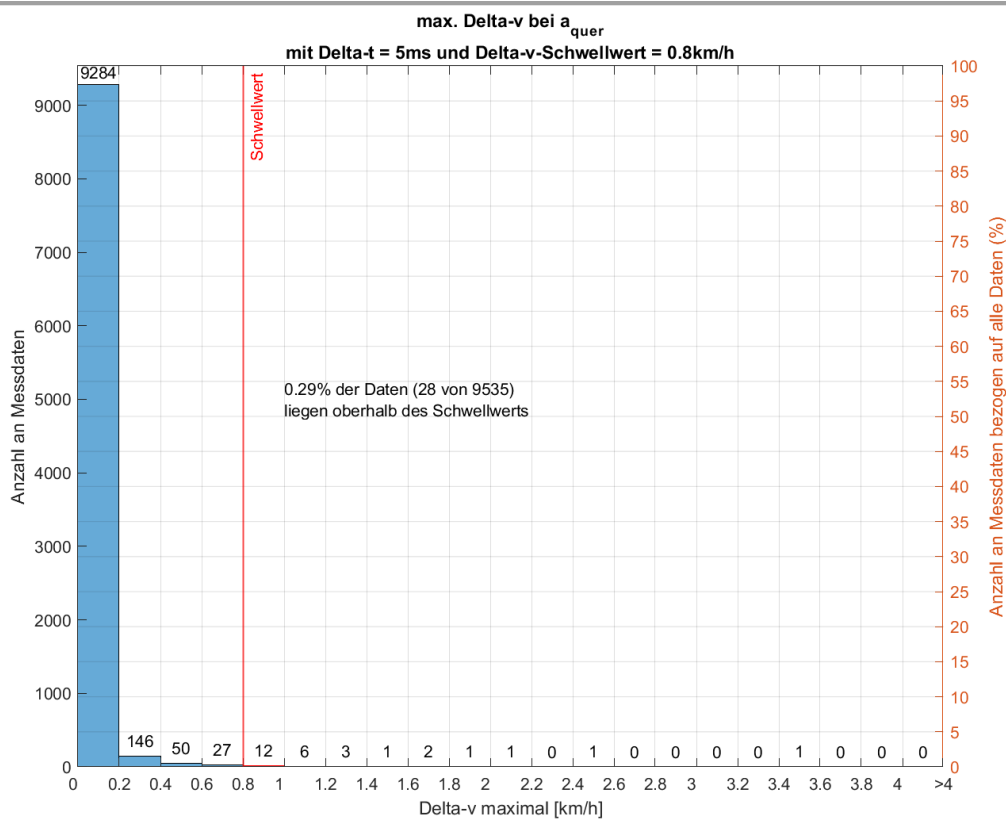


Anlage 21: Statistische Verteilung (Anzahl und Prozent) der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung bei einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

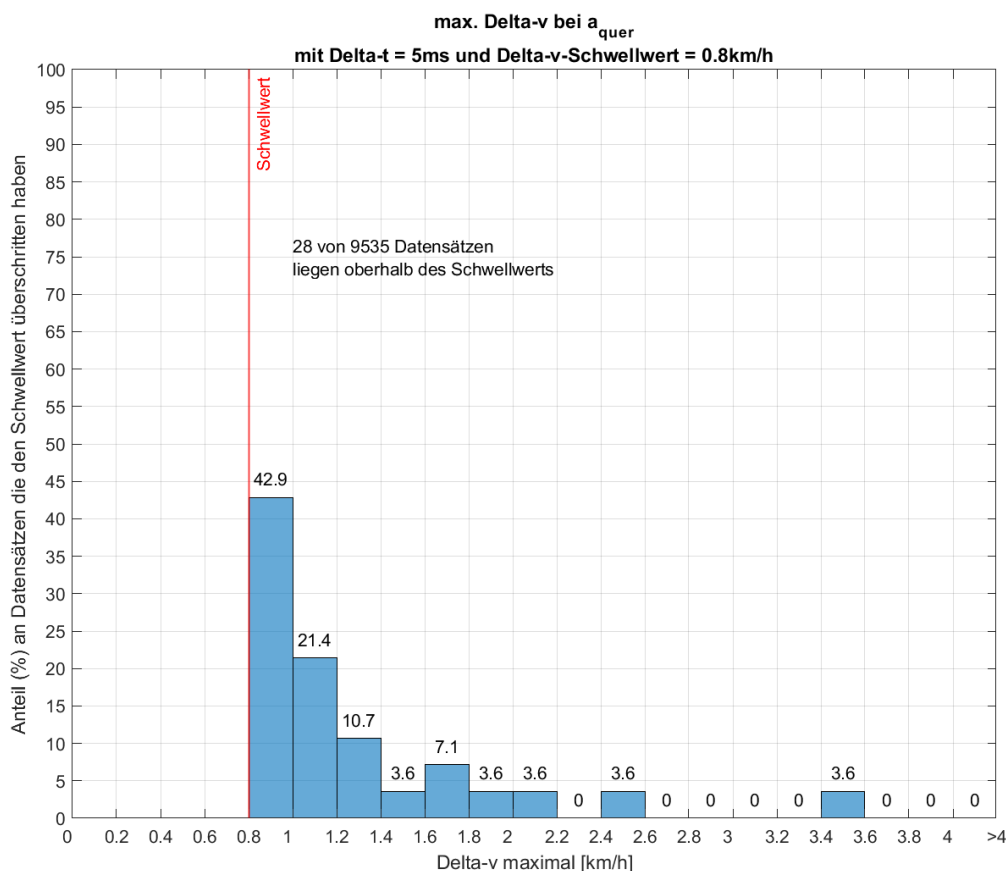


Anlage 22: Prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen in Längsrichtung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

Anlagen

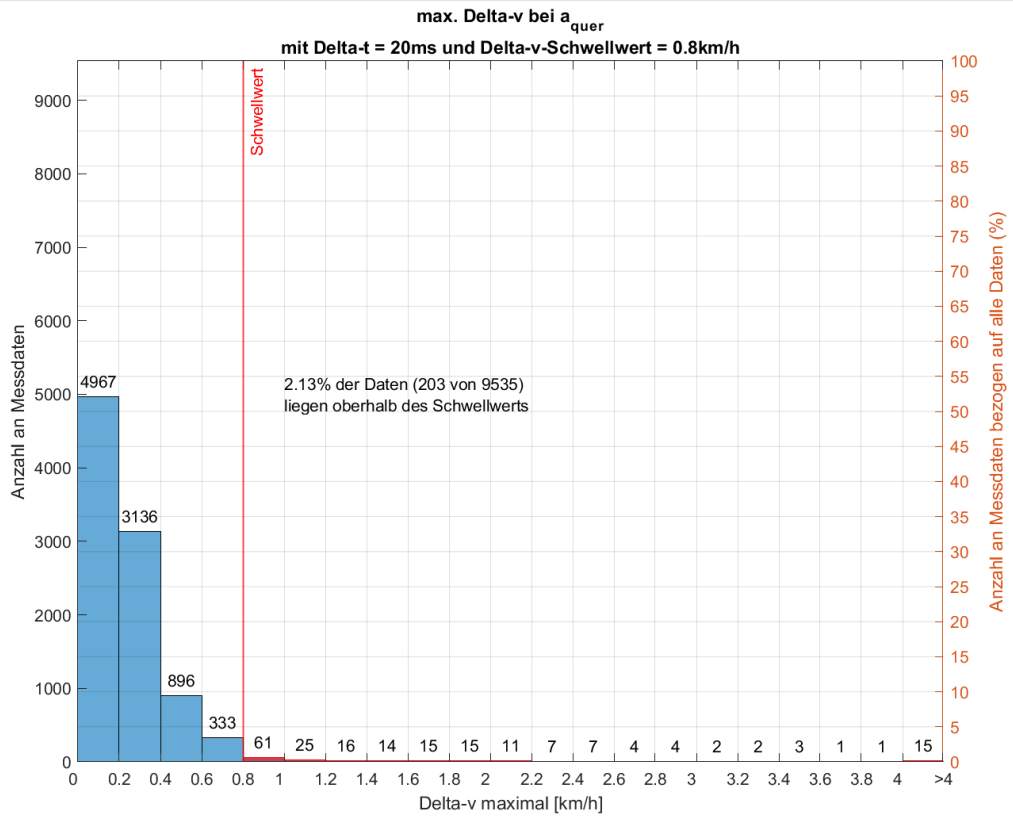


Anlage 23: Statistische Verteilung (Anzahl und Prozent) der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung bei einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

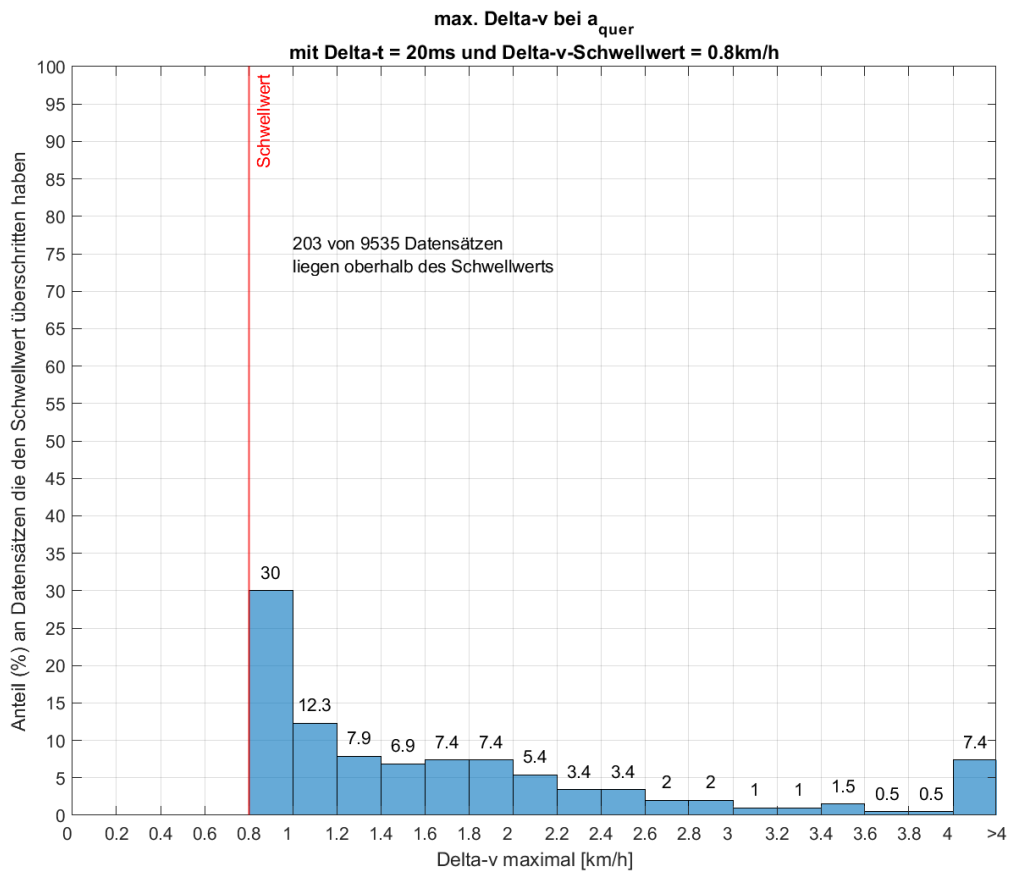


Anlage 24: Prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen in Querrichtung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,8 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

Anlagen

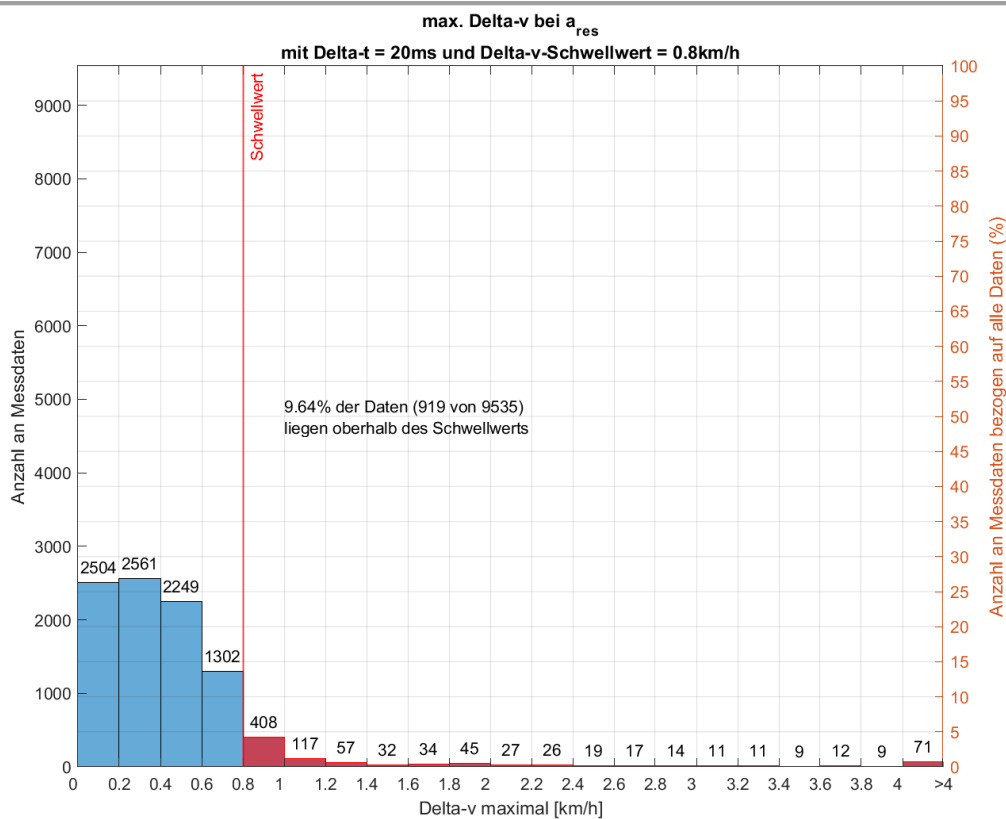


Anlage 25: Statistische Verteilung (Anzahl und Prozent) der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung bei einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

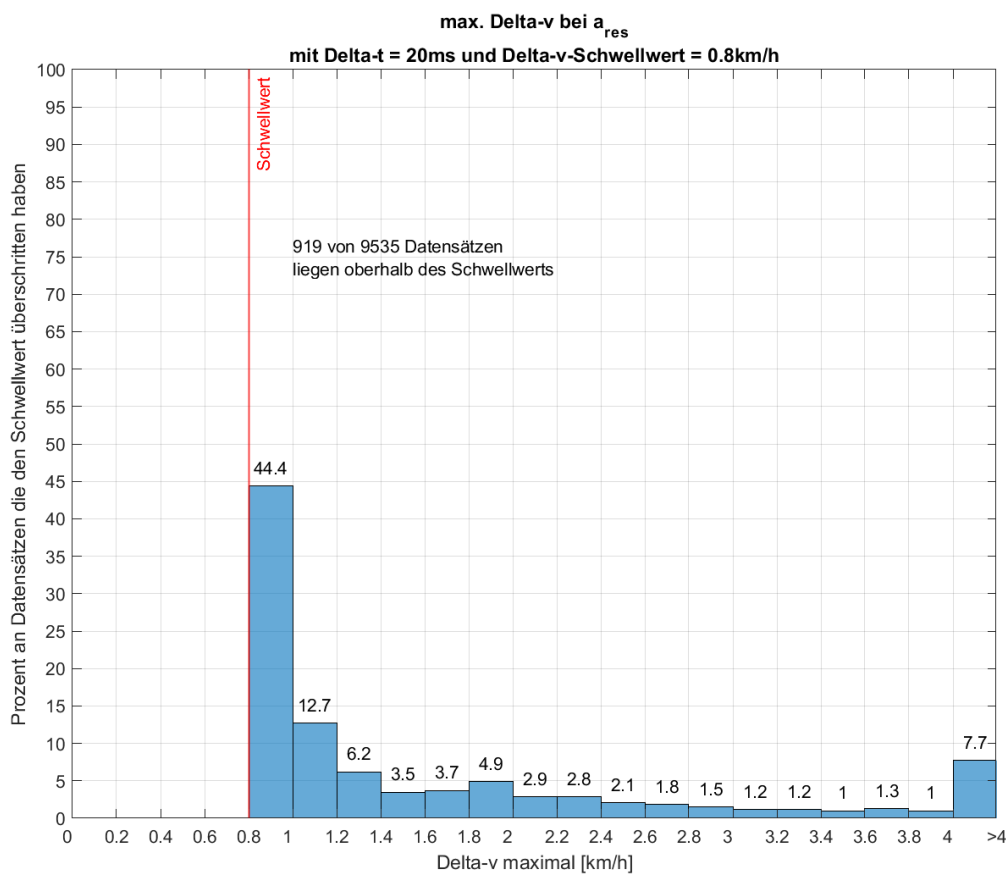


Anlage 26: Prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen in Querrichtung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

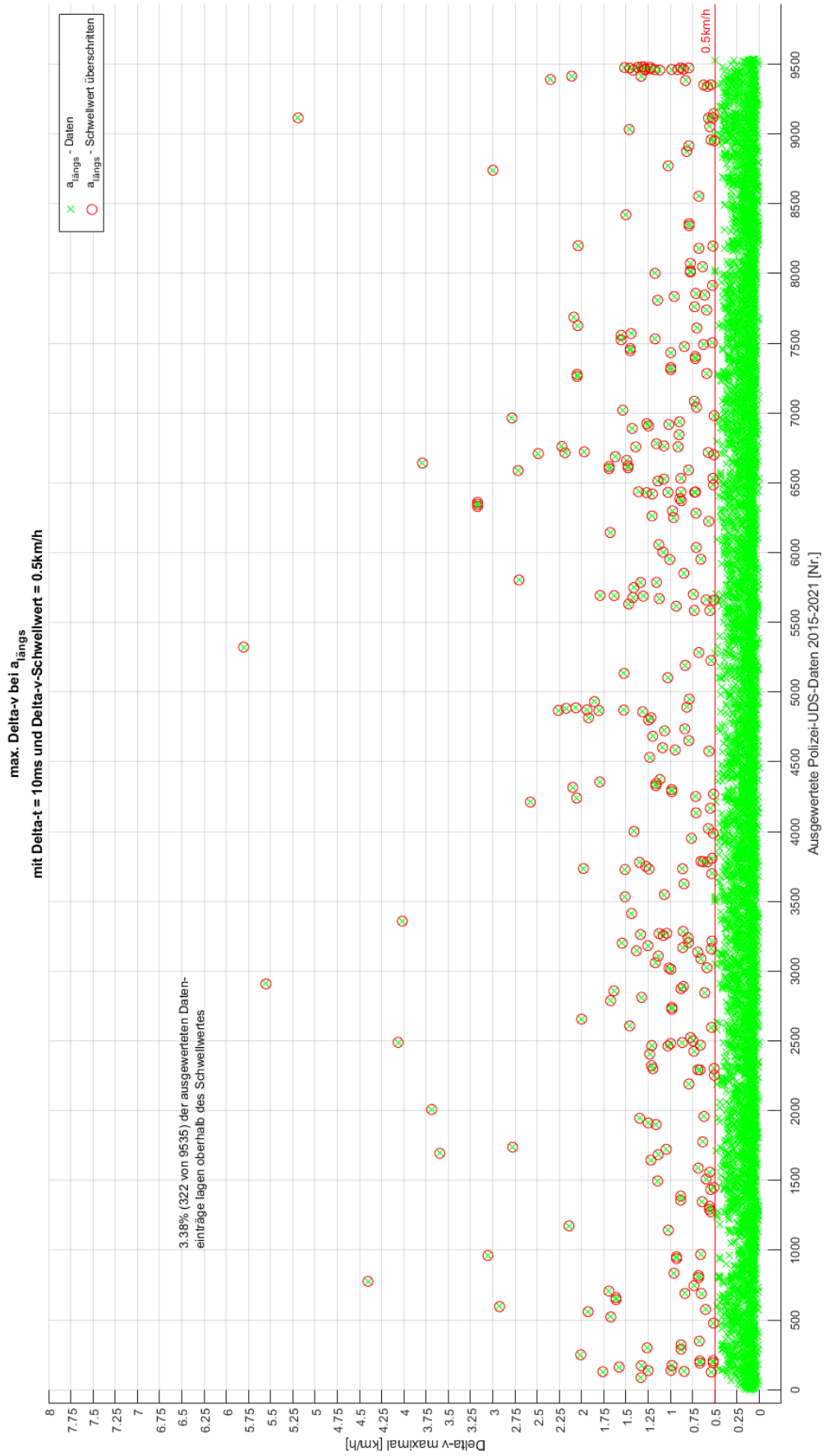
Anlagen



Anlage 27: Statistische Verteilung (Anzahl und Prozent) der Geschwindigkeitsänderung der resultierenden Beschleunigung bei einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

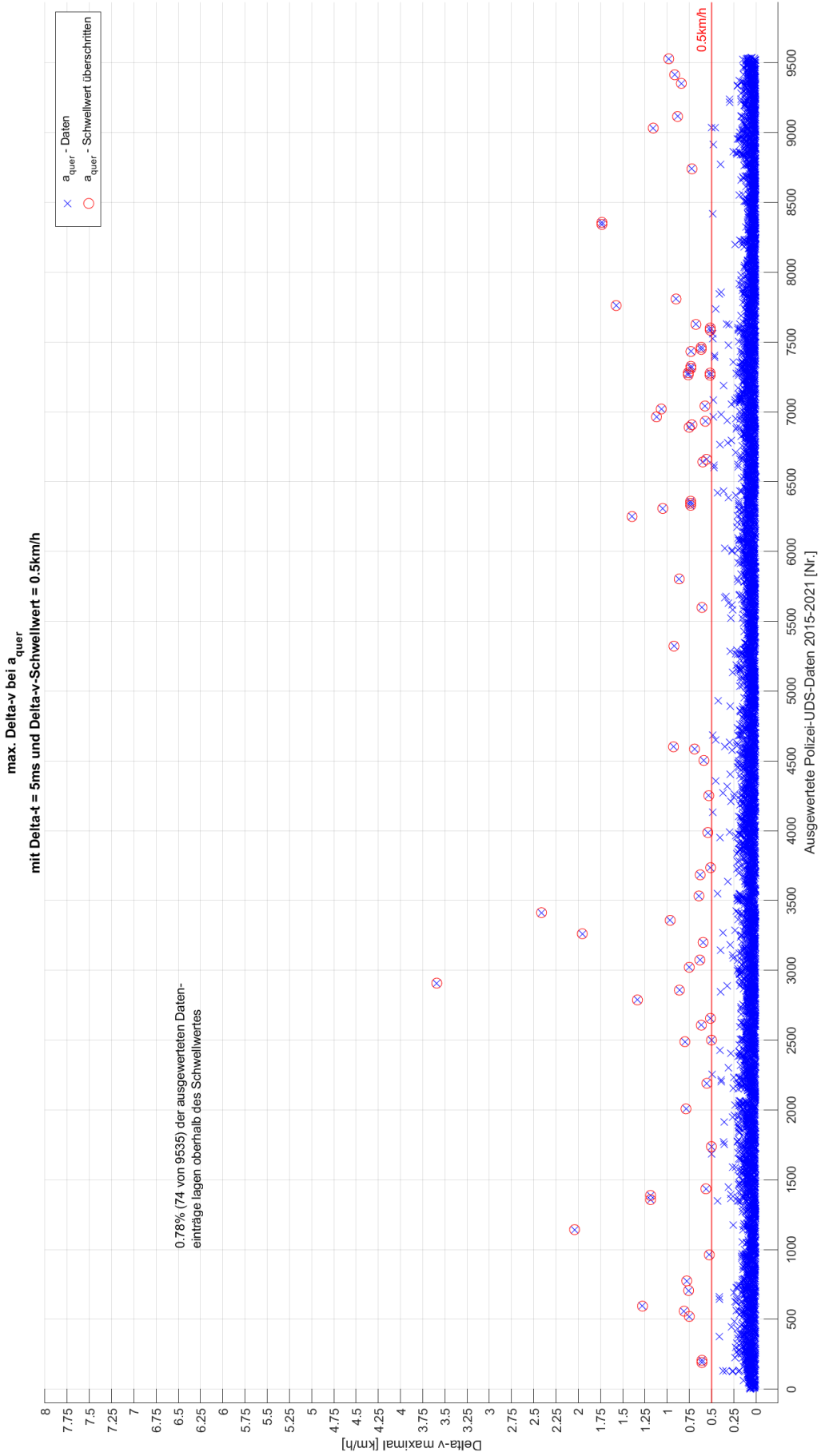


Anlage 28: Prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen der resultierenden Beschleunigung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)



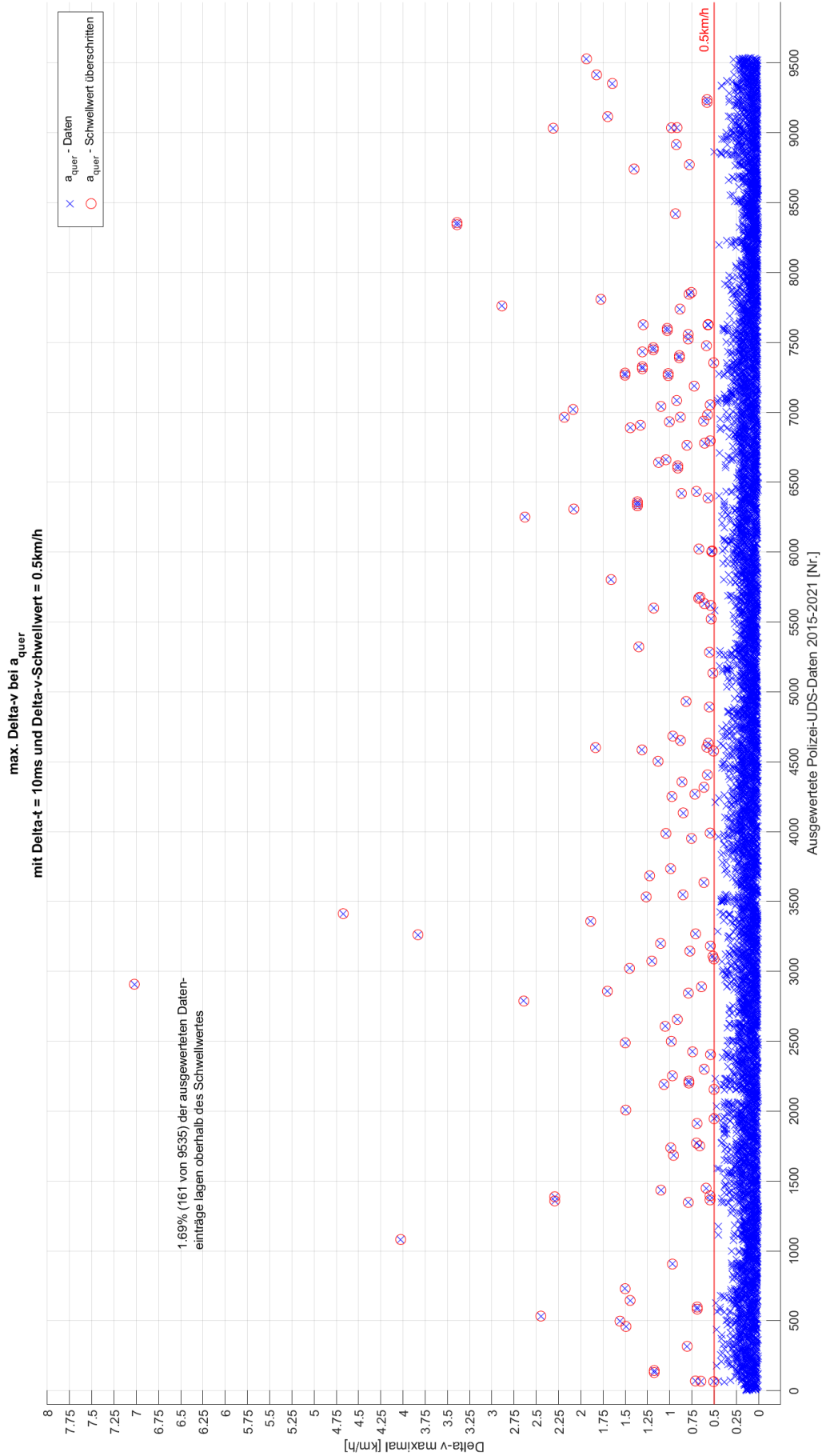
Anlage 29: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

Anlagen



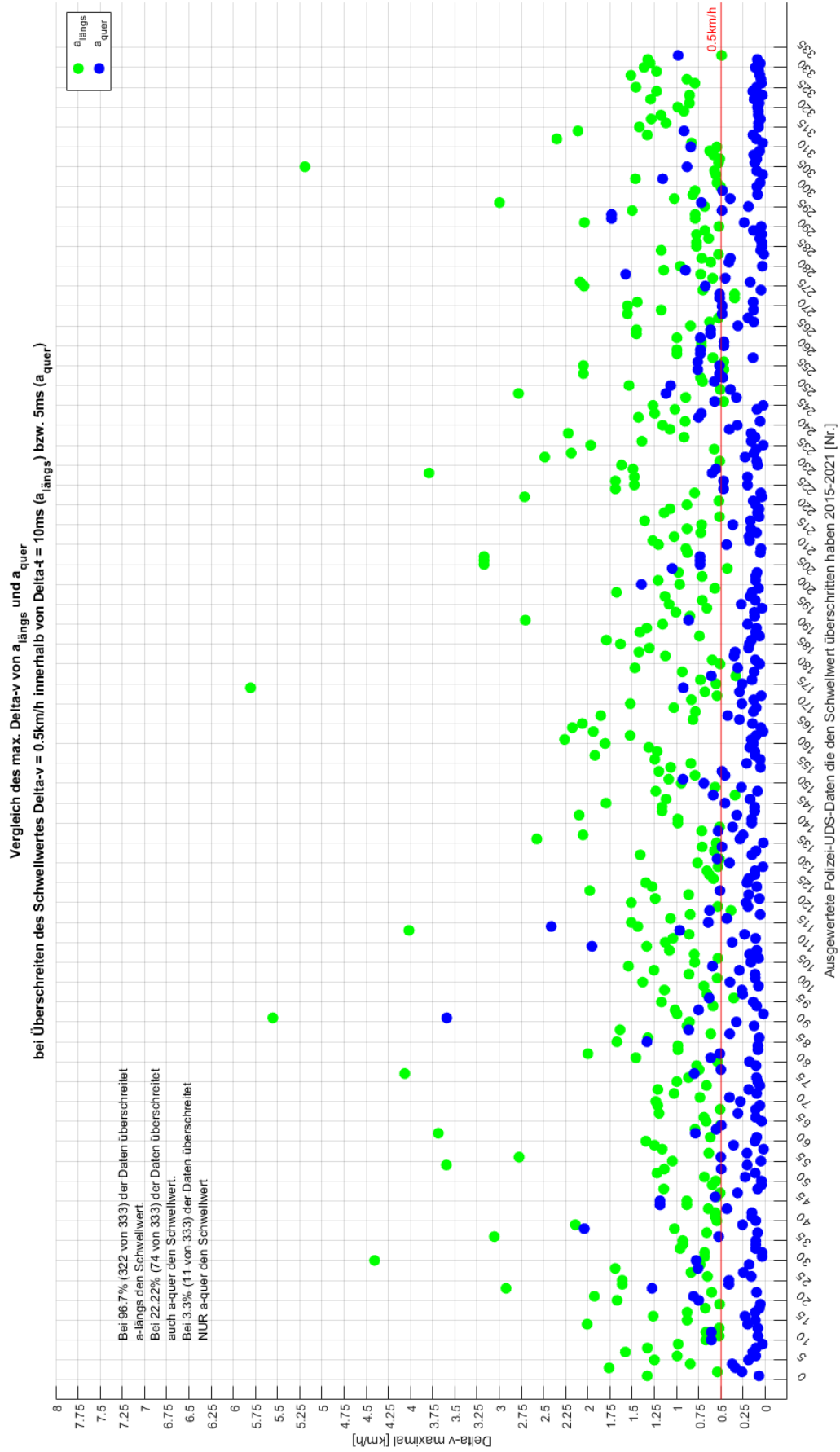
Anlage 30: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

Anlagen



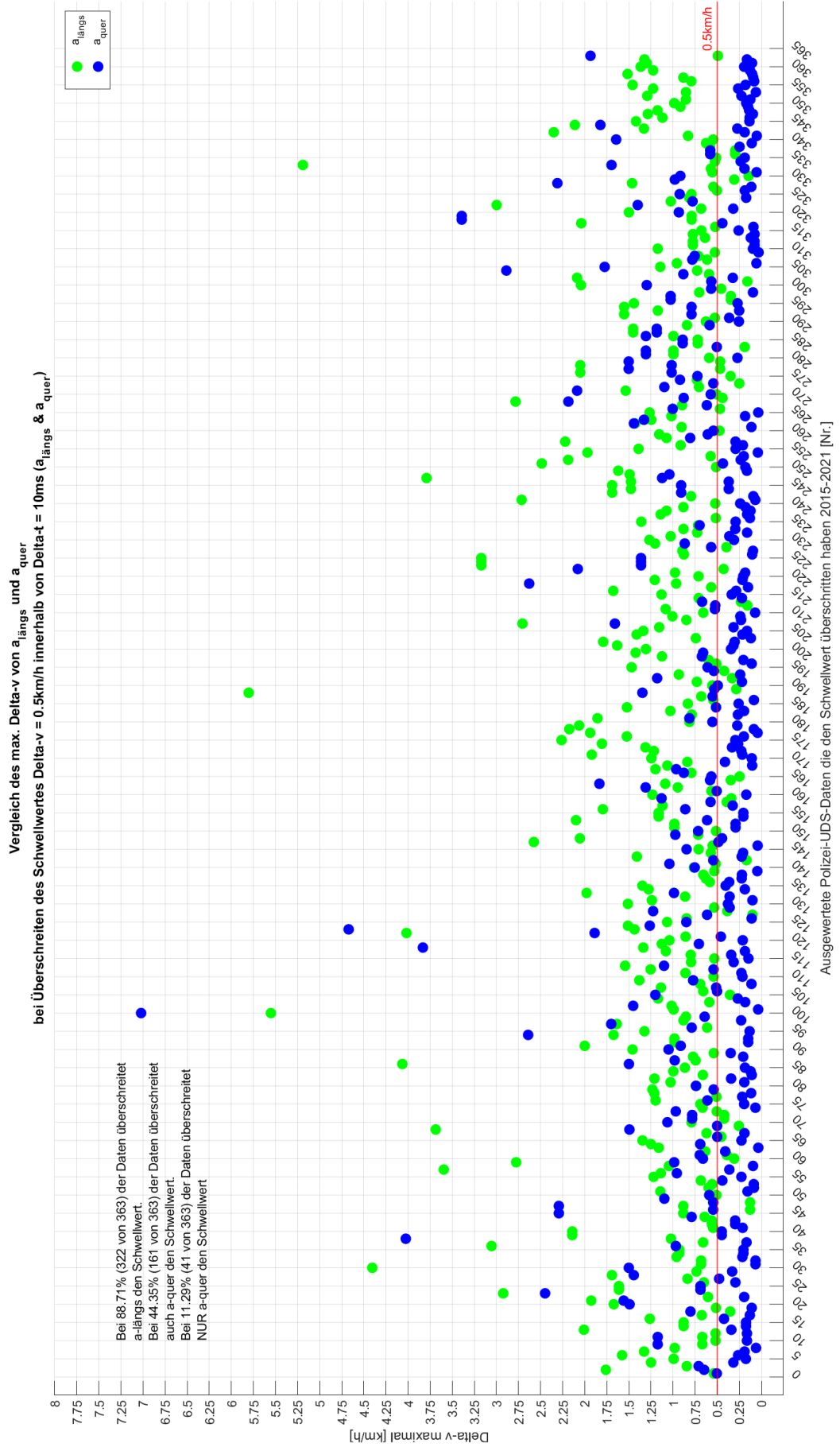
Anlage 31: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

Anlagen



Anlage 32: Vergleich der Geschwindigkeitsänderungen in Längs- und Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10/5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

Anlagen



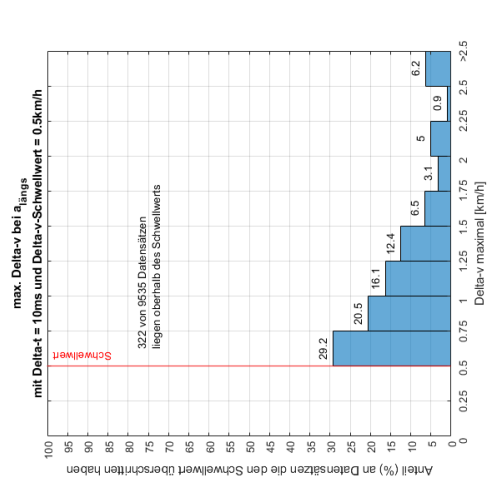
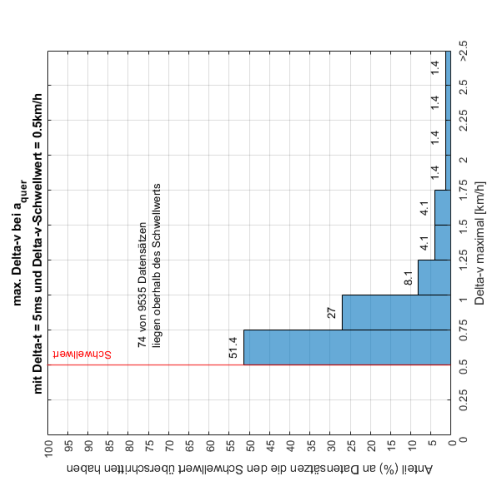
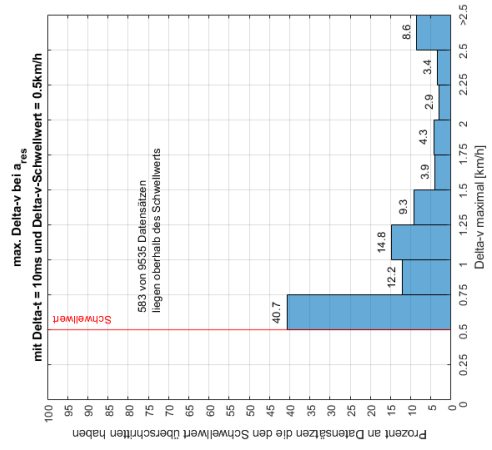
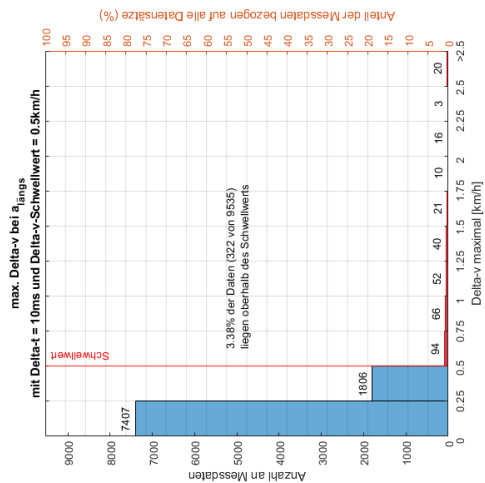
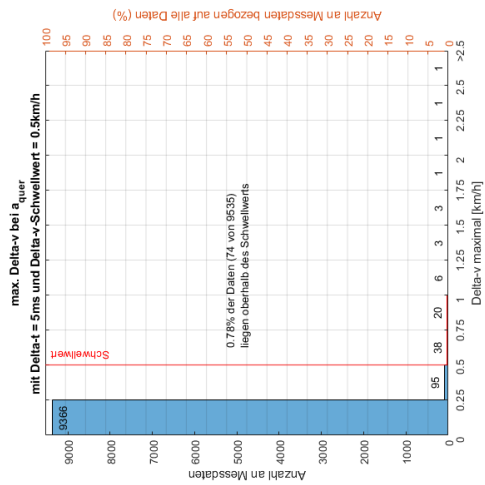
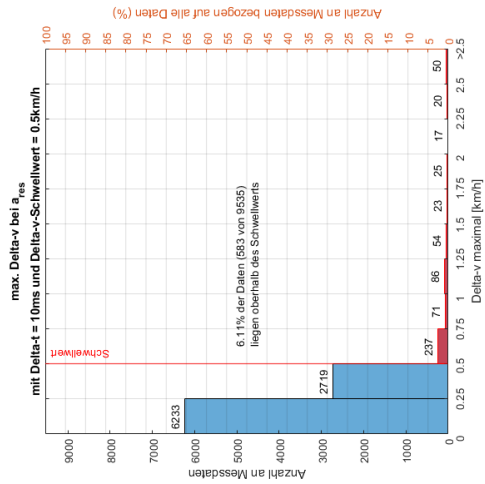
Anlage 33: Vergleich der Geschwindigkeitsänderungen in Längs- und Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

Anlagen



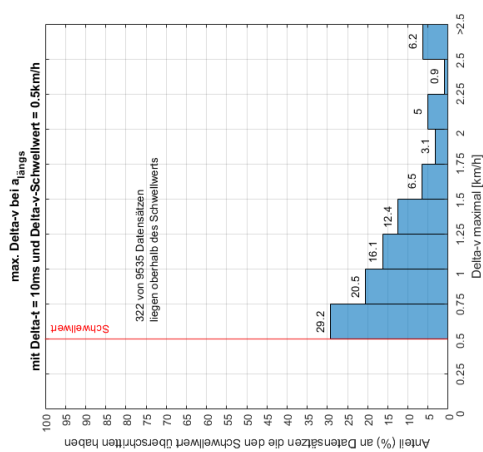
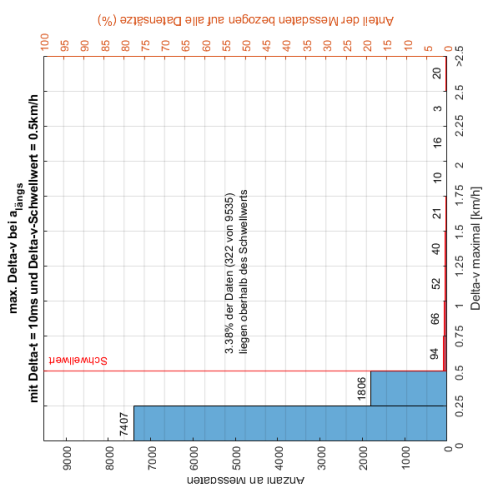
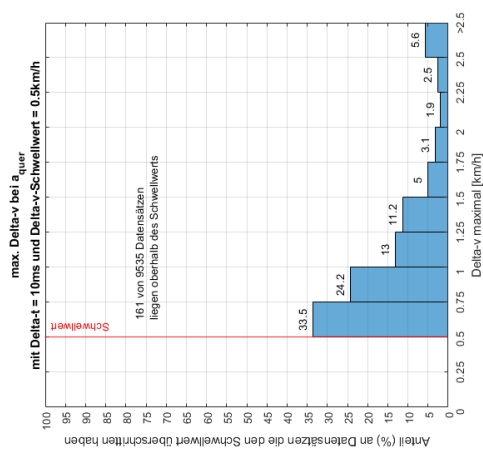
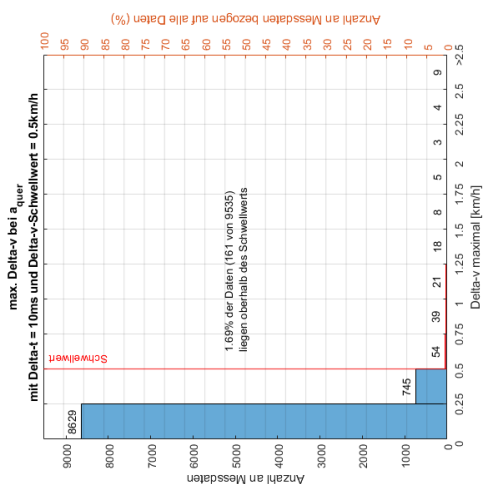
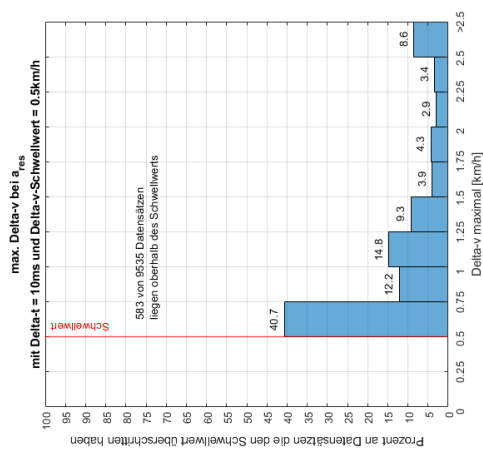
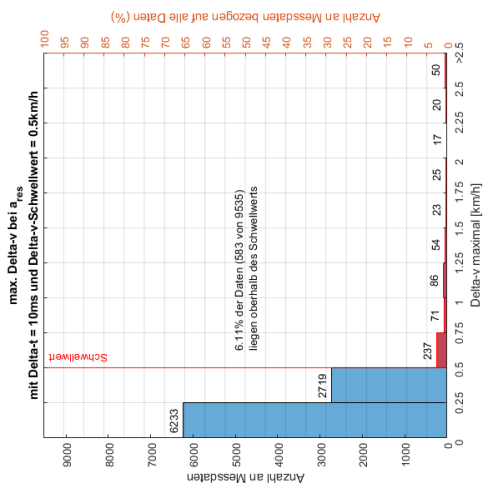
Anlage 34: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung der resultierenden Beschleunigung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

Anlagen



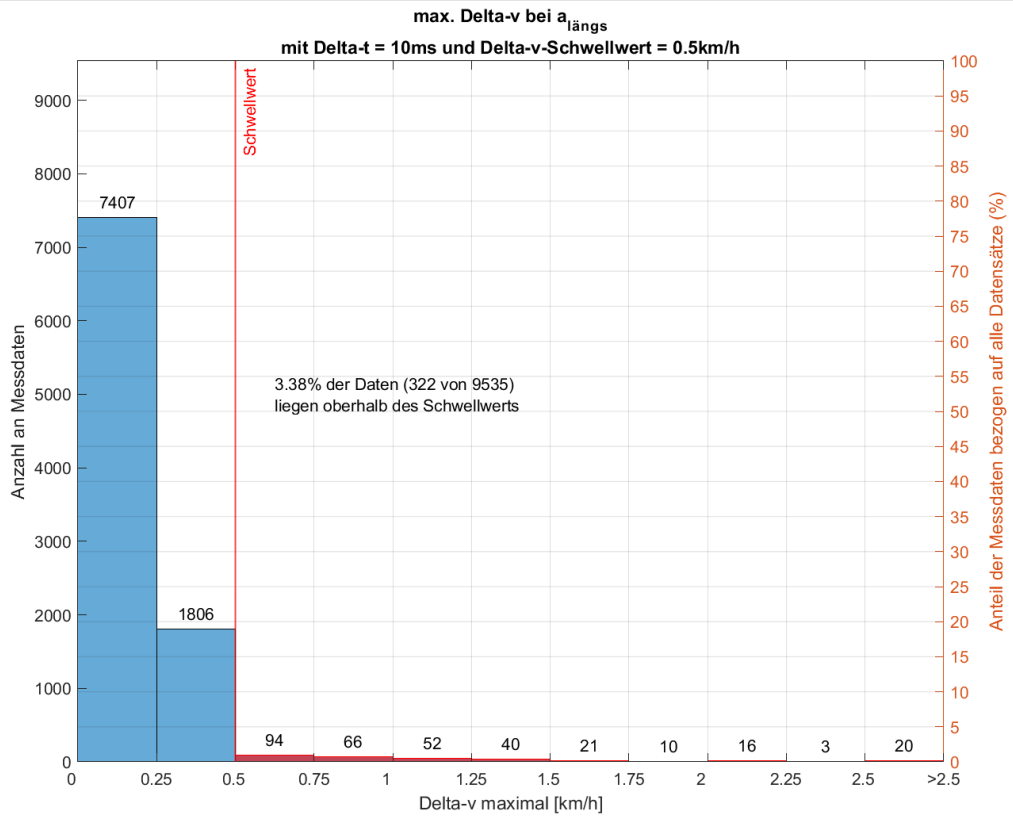
Anlage 35 & 36: Statistische Verteilung der Geschwindigkeitsänderung in Anzahl und Prozent (links) und prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,5 km/h innerhalb von 10/5 ms (rechts) (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

Anlagen

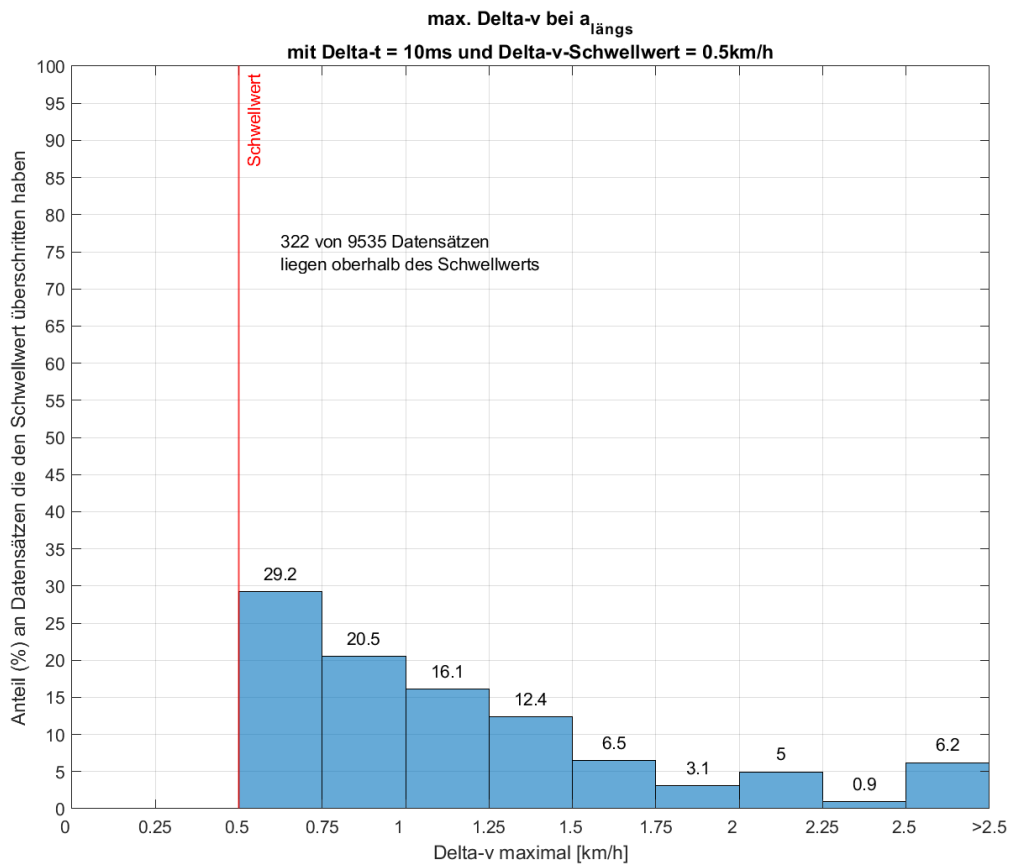


Anlage 37 & 38: Statistische Verteilung der Geschwindigkeitsänderung in Anzahl und Prozent (links) und prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (rechts) (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

Anlagen

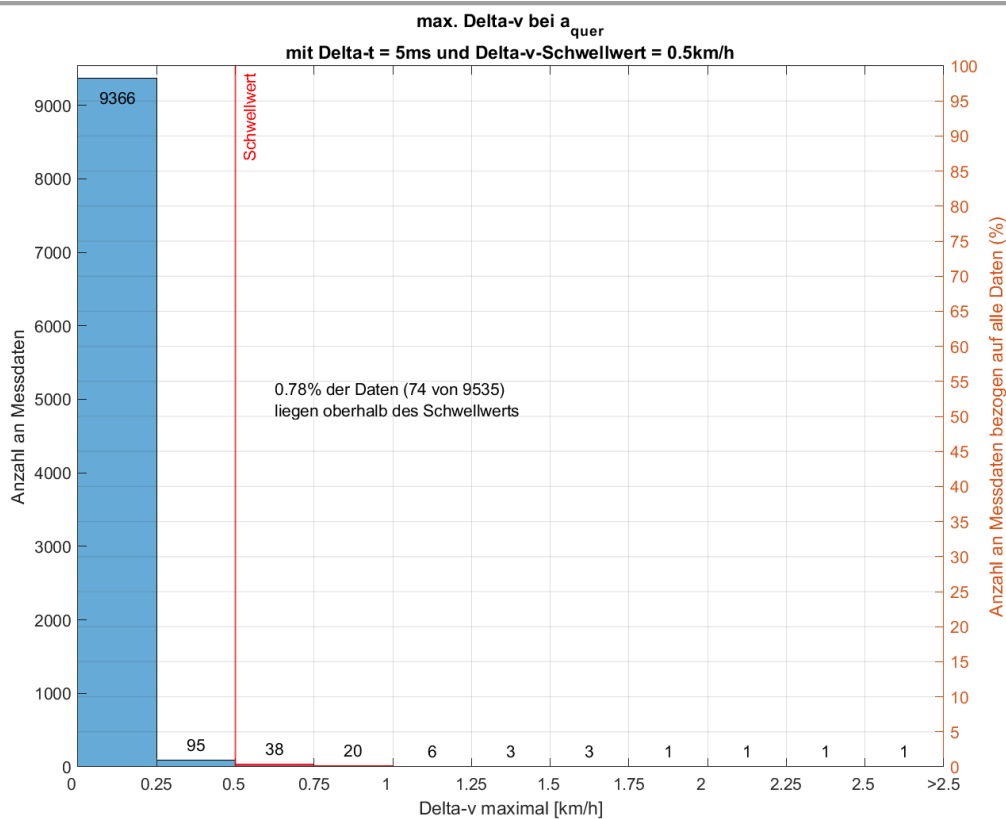


Anlage 39: Statistische Verteilung (Anzahl und Prozent) der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung bei einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

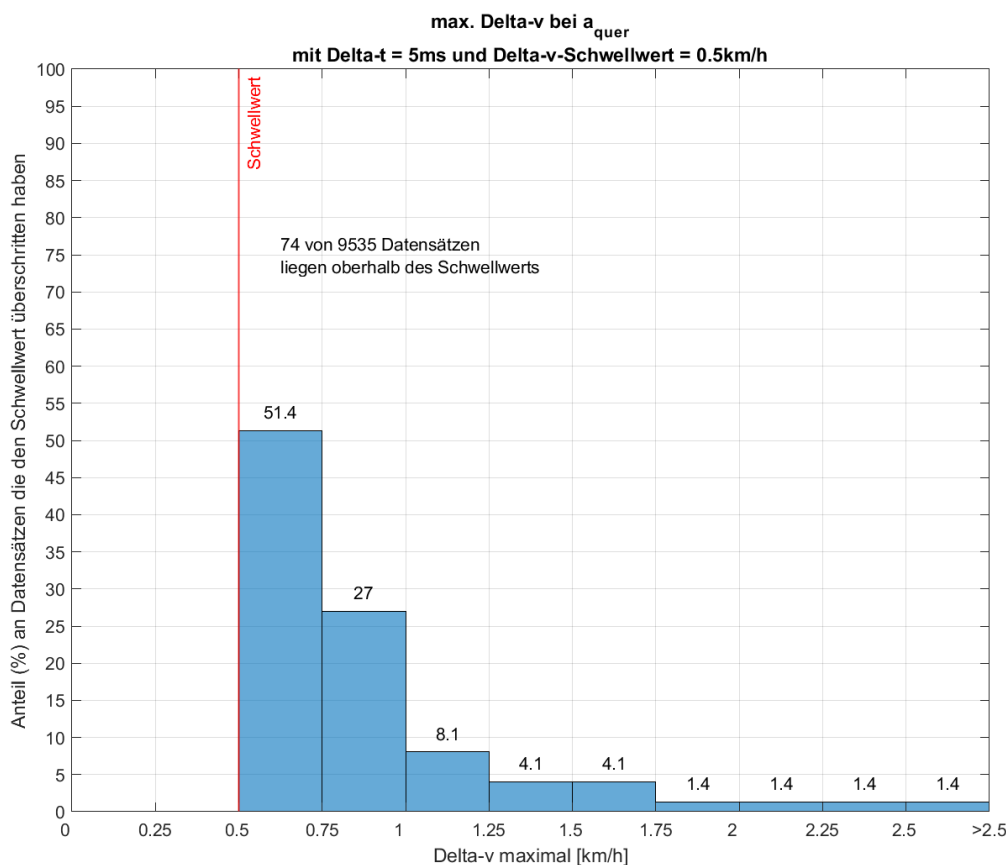


Anlage 40: Prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen in Längsrichtung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

Anlagen

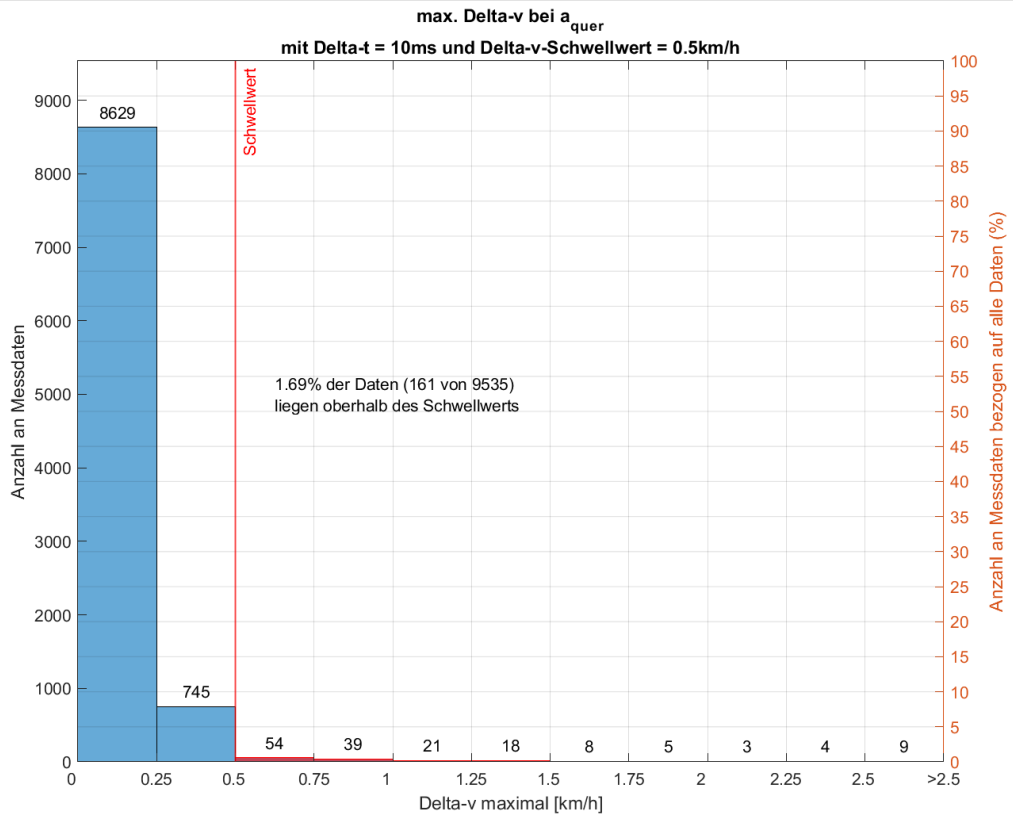


Anlage 41: Statistische Verteilung (Anzahl und Prozent) der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung bei einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

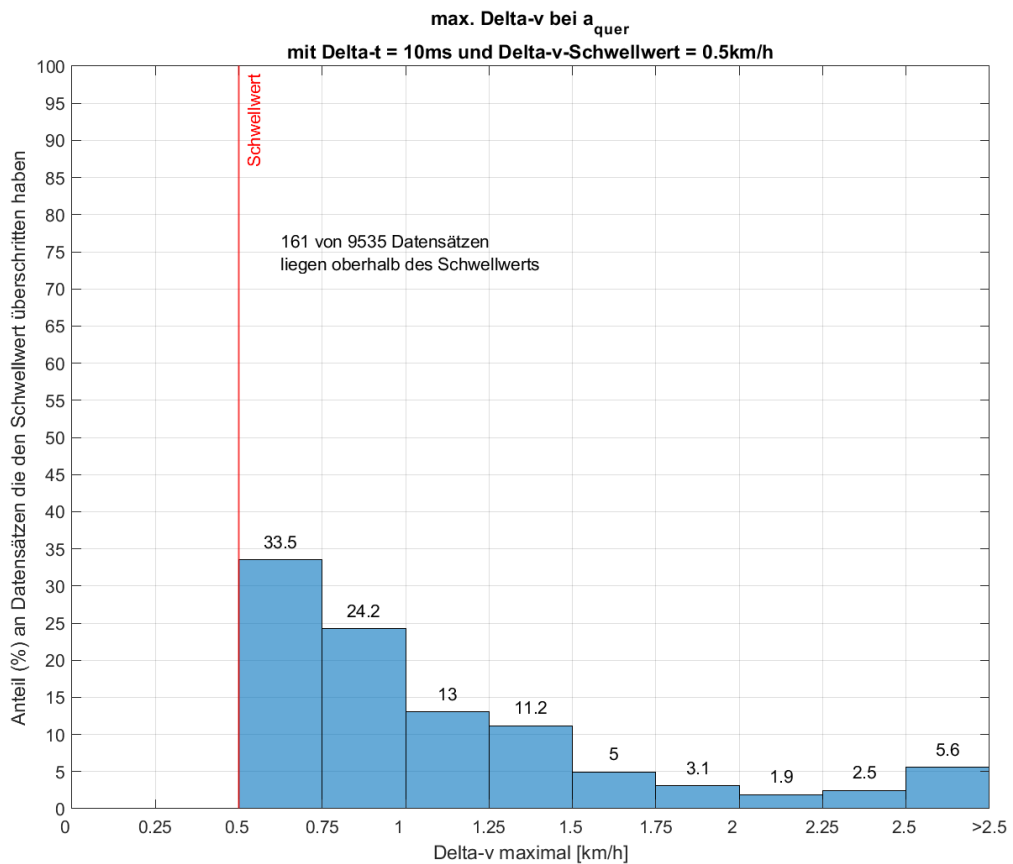


Anlage 42: Prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen in Querrichtung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,5 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

Anlagen

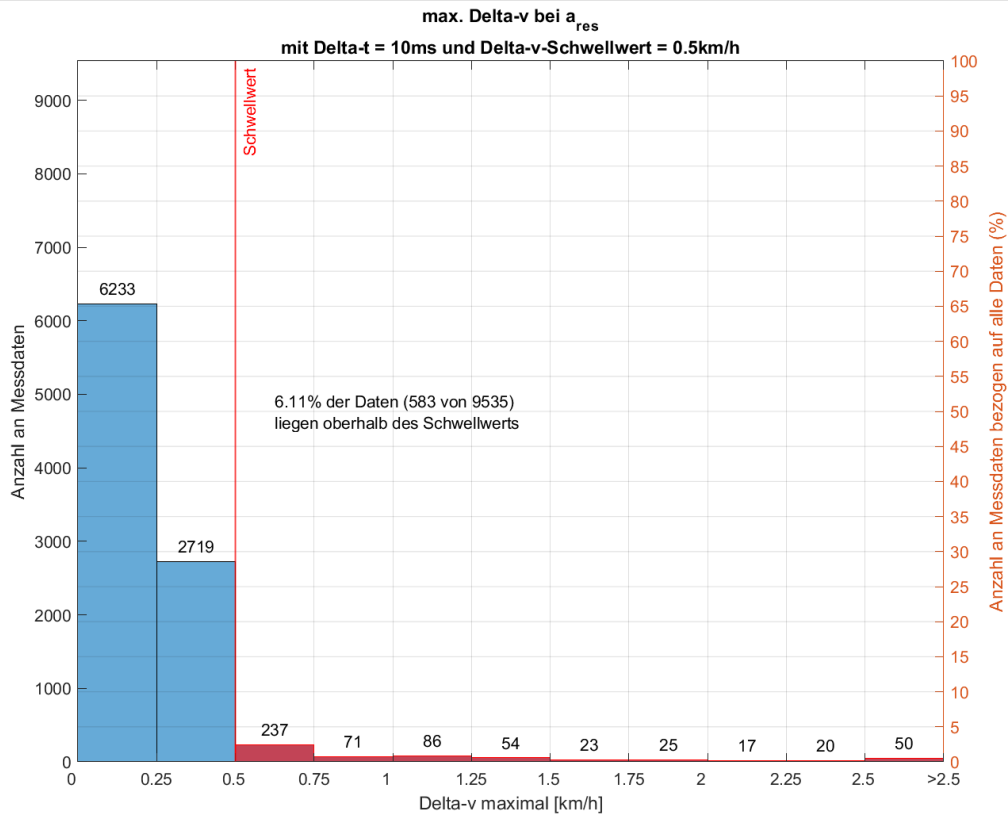


Anlage 43: Statistische Verteilung (Anzahl und Prozent) der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung bei einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

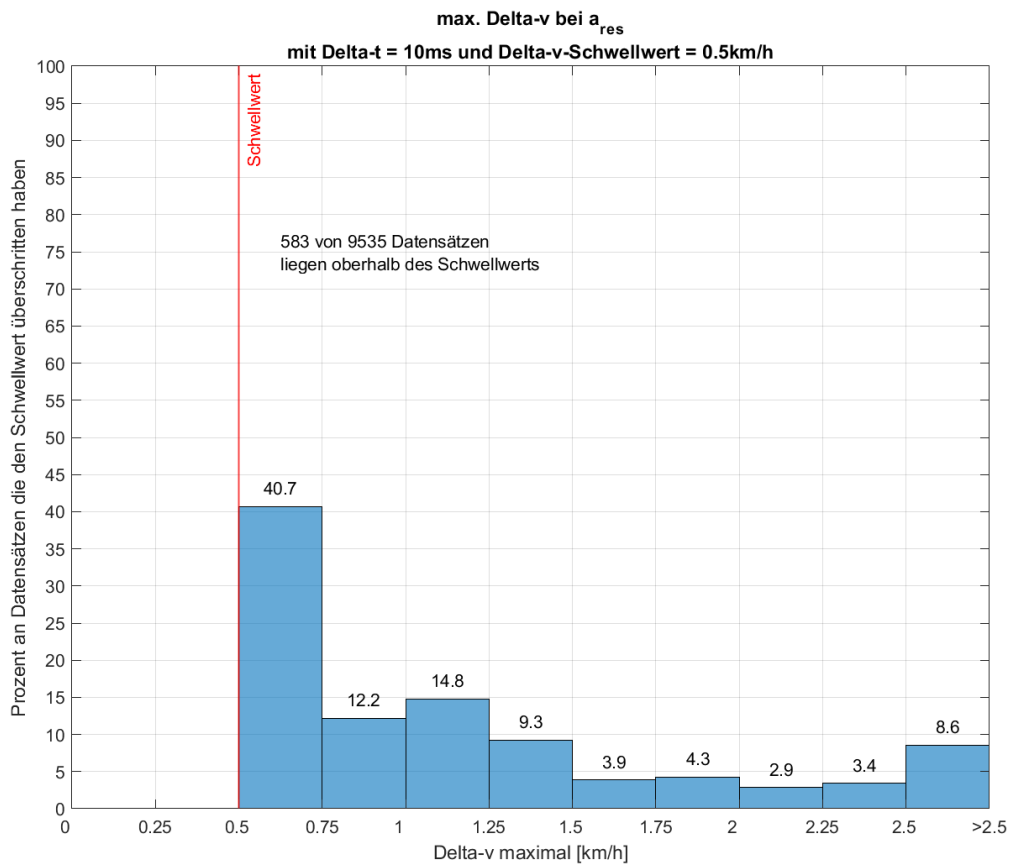


Anlage 44: Prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen in Querrichtung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

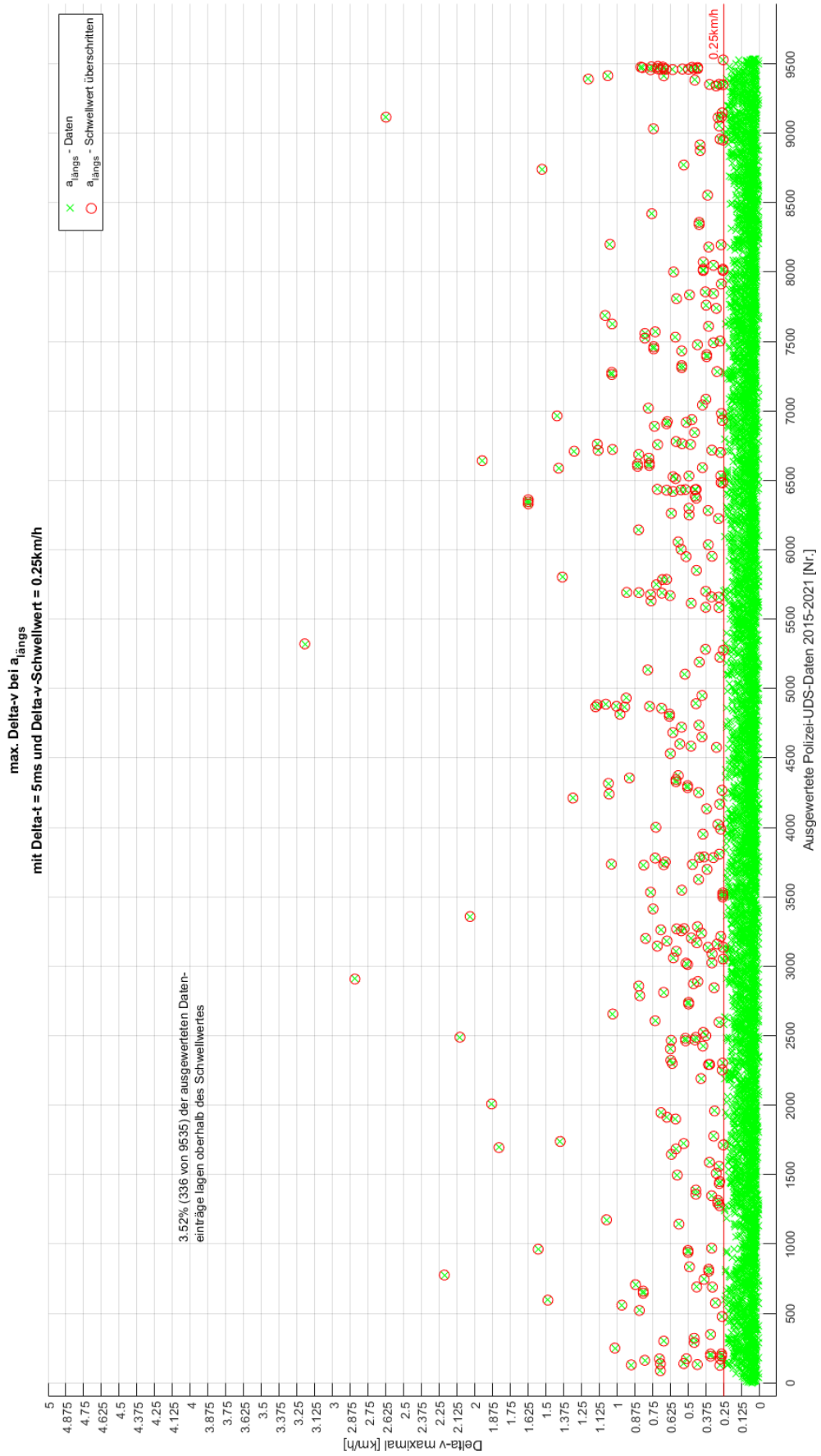
Anlagen



Anlage 45: Statistische Verteilung (Anzahl und Prozent) der Geschwindigkeitsänderung der resultierenden Beschleunigung bei einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

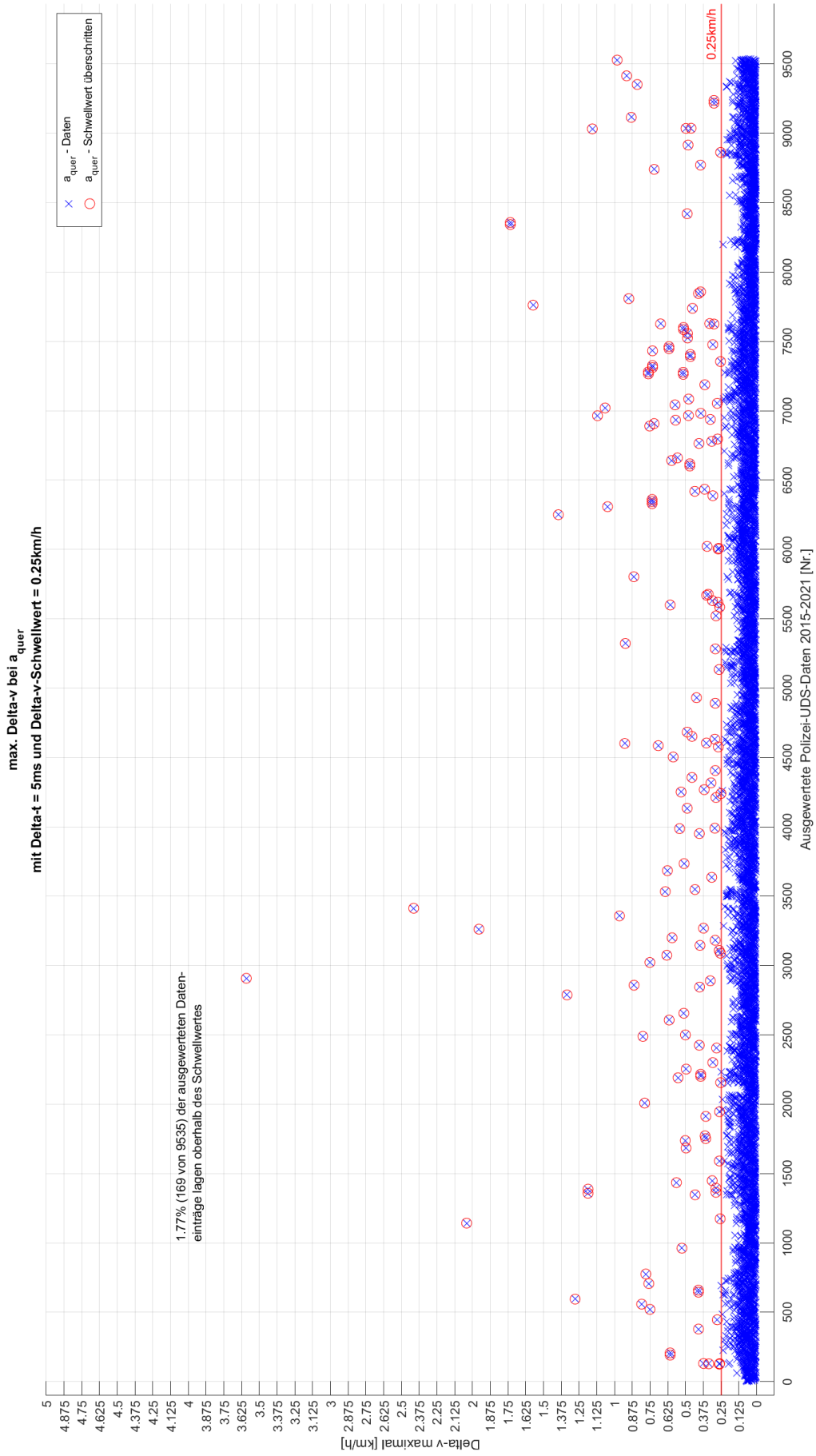


Anlage 46: Prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen der resultierenden Beschleunigung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

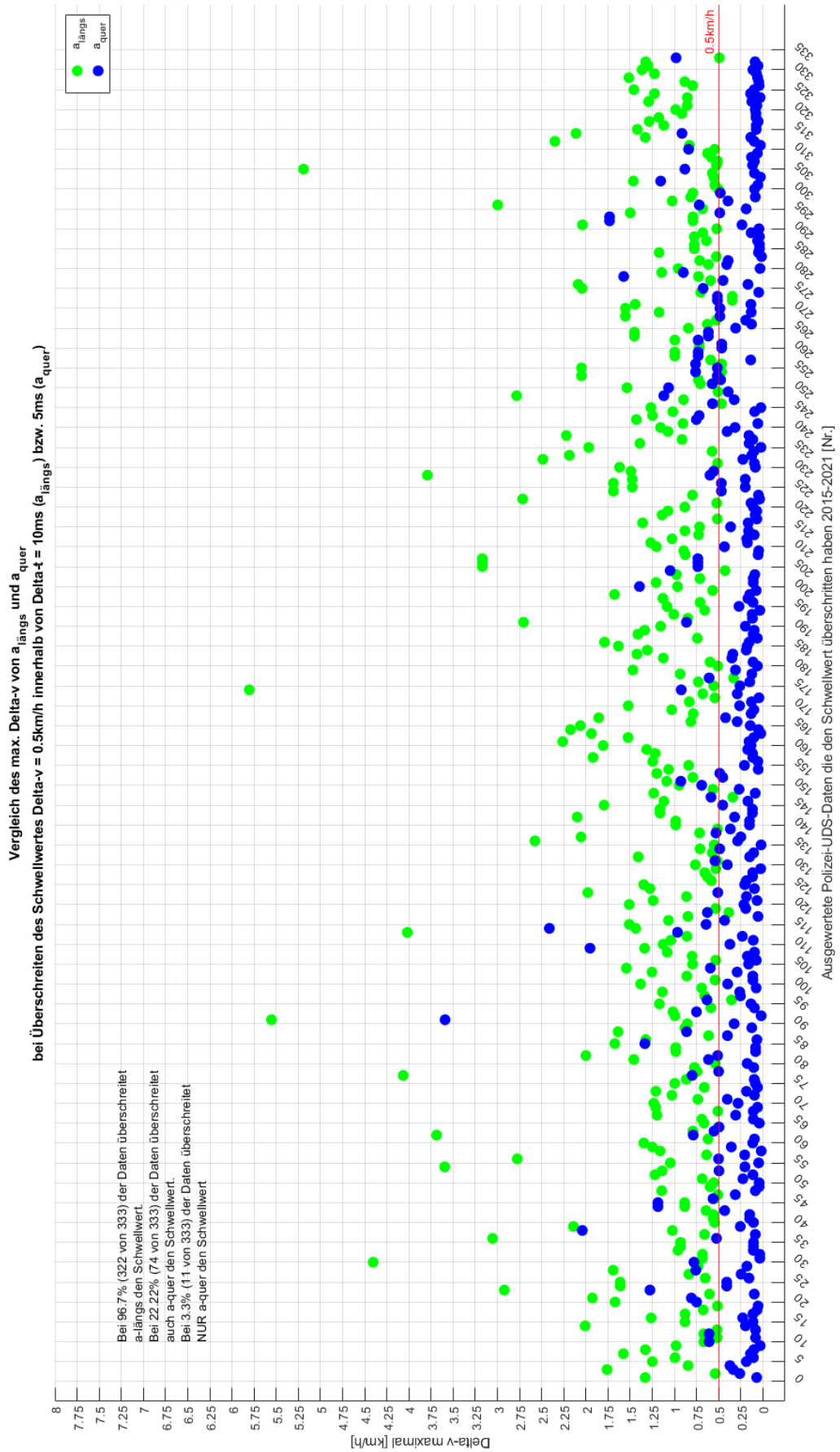


Anlage 47: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

Anlagen

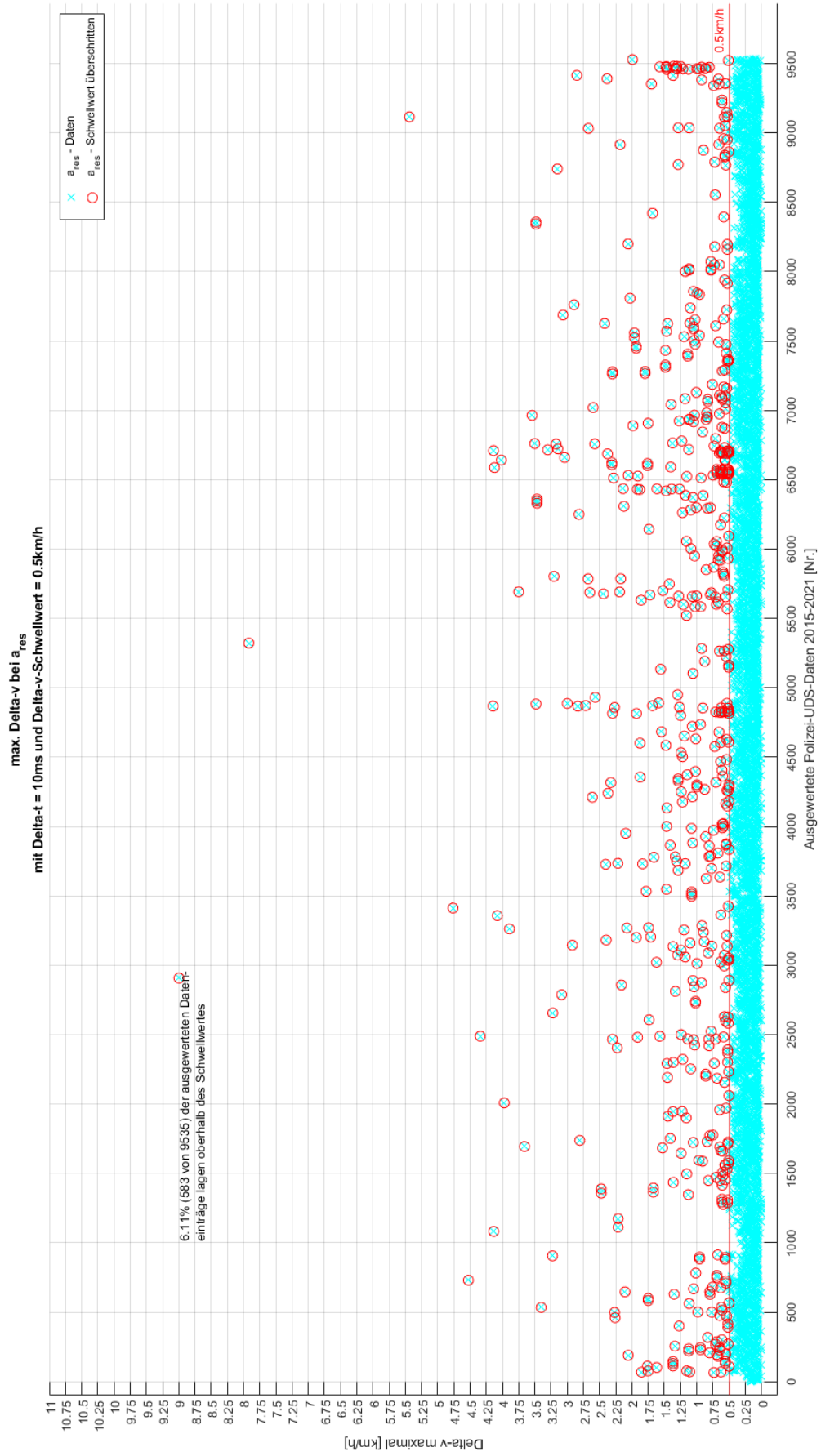


Anlage 48: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)



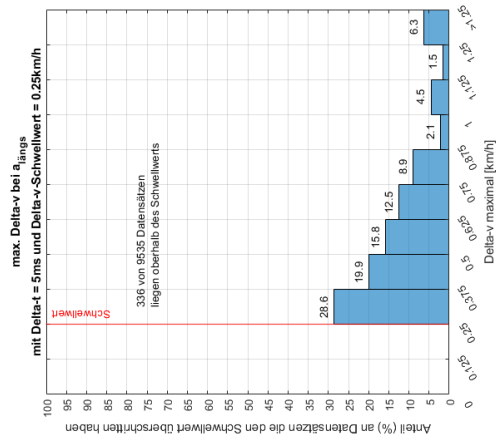
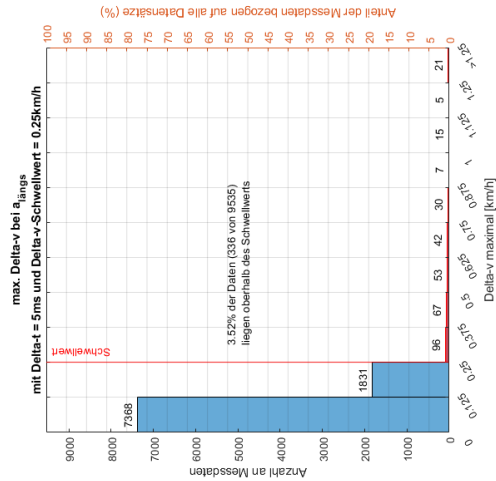
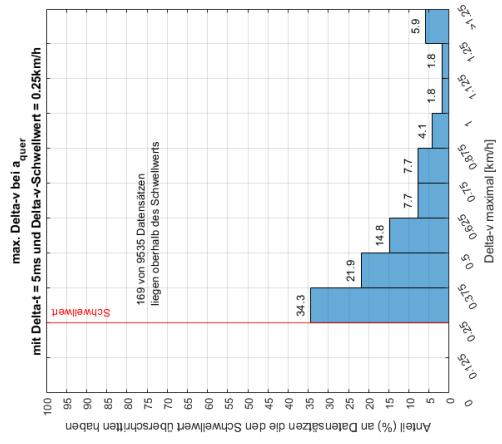
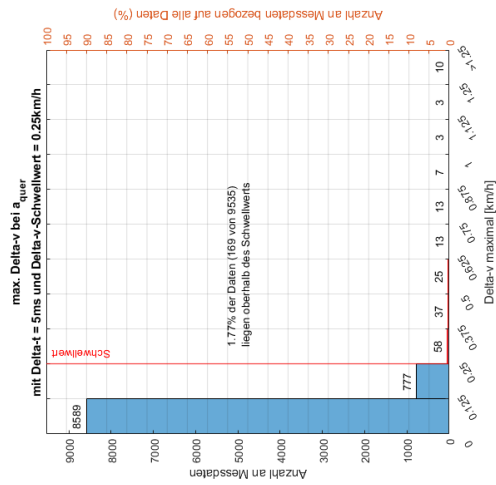
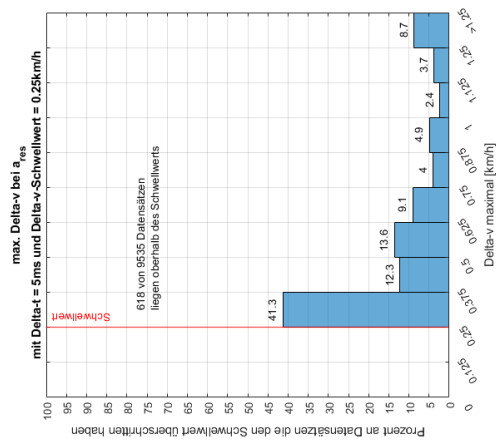
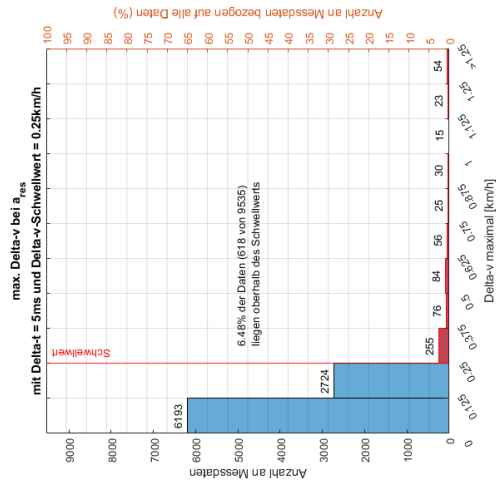
Anlage 49: Vergleich der Geschwindigkeitsänderungen in Längs- und Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

Anlagen



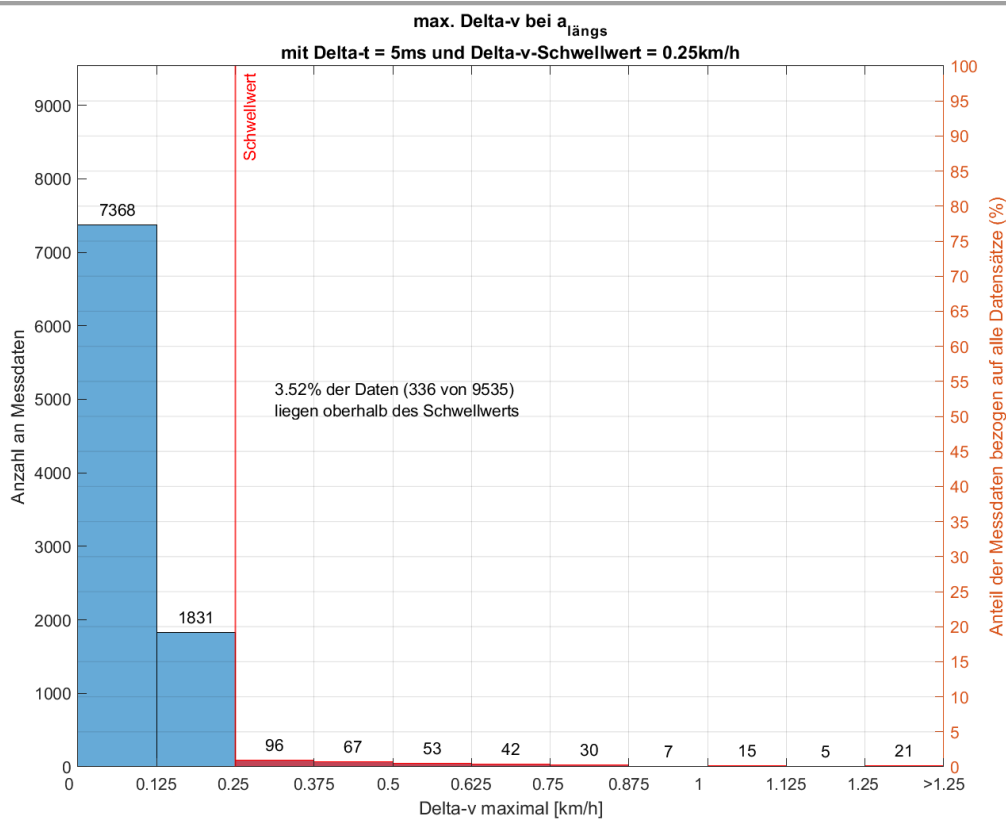
Anlage 50: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung der resultierenden Beschleunigung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

Anlagen

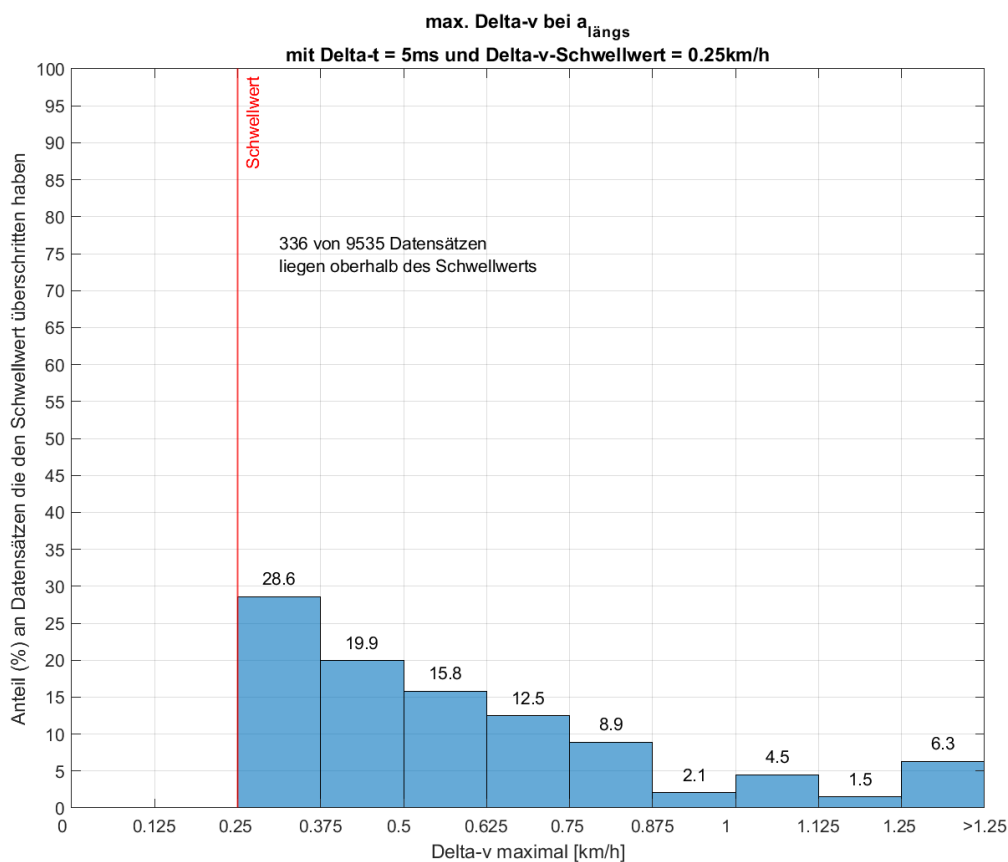


Anlage 51 & 52: Statistische Verteilung der Geschwindigkeitsänderung in Anzahl und Prozent (links) und prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (rechts) (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

Anlagen

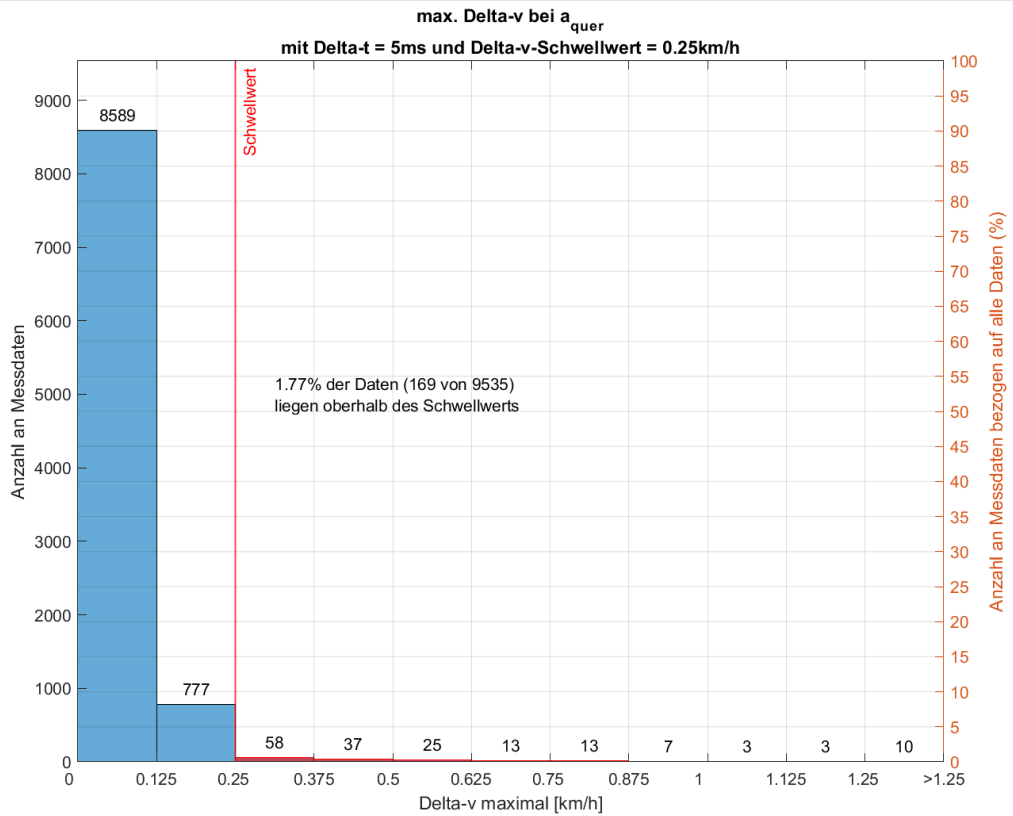


Anlage 53: Statistische Verteilung (Anzahl und Prozent) der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung bei einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

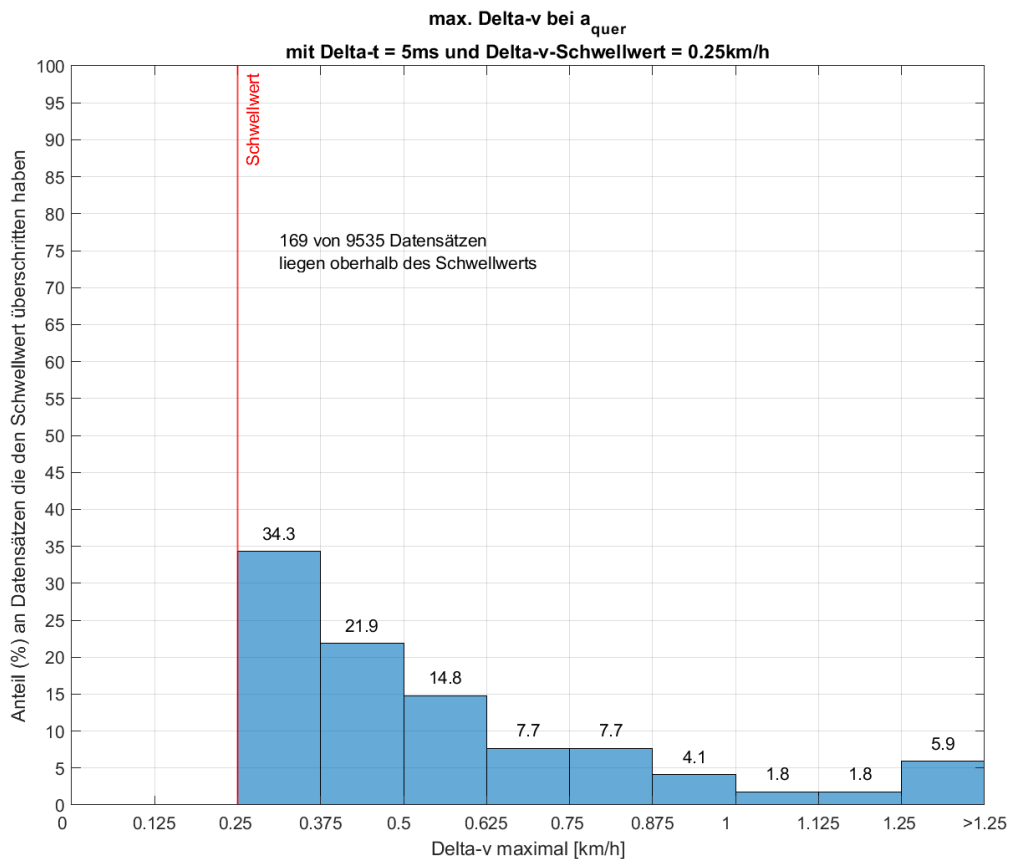


Anlage 54: Prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen in Längsrichtung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

Anlagen

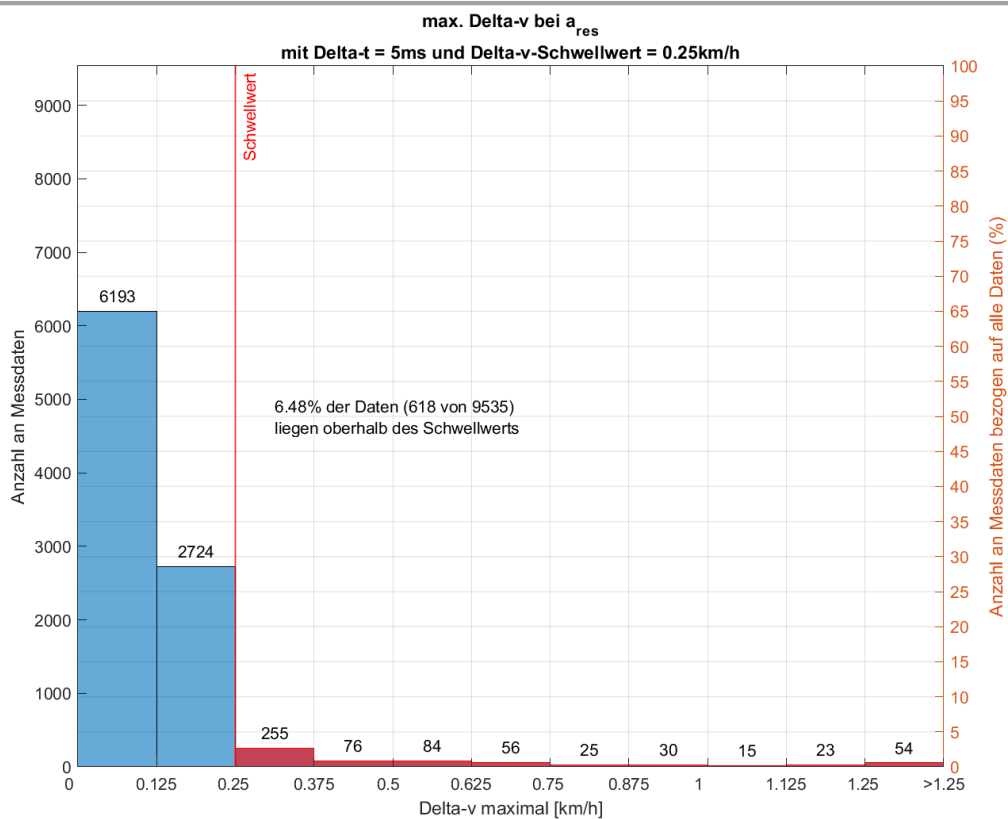


Anlage 55: Statistische Verteilung (Anzahl und Prozent) der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung bei einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

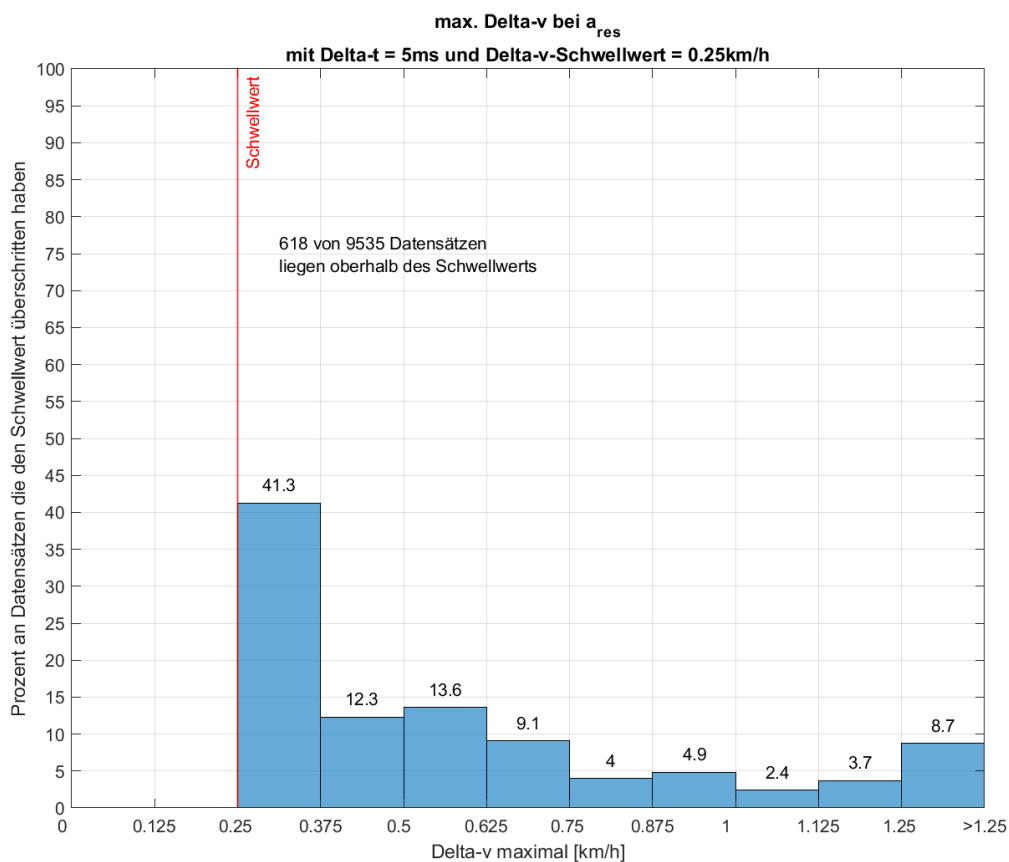


Anlage 56: Prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen in Querrichtung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

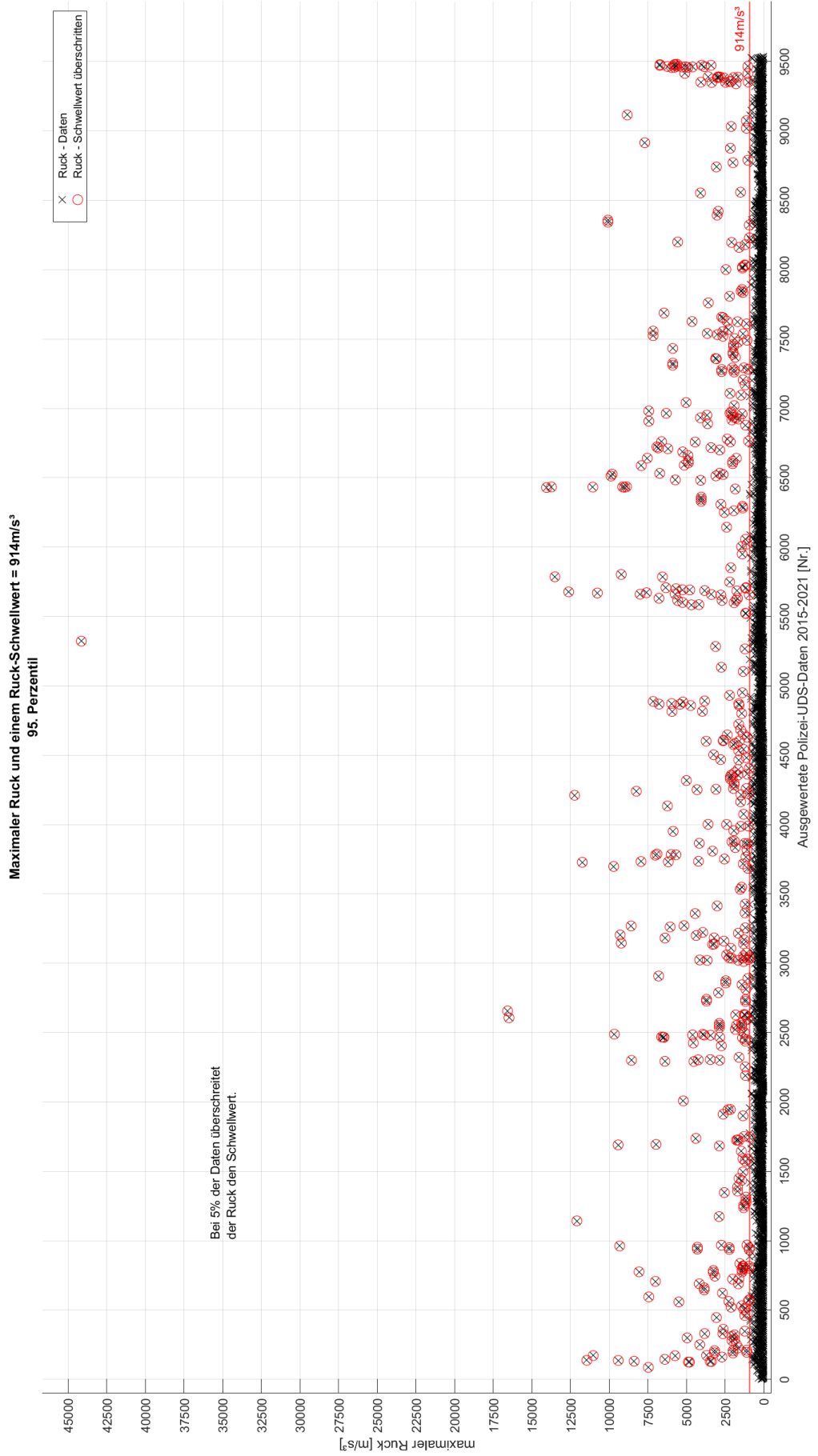
Anlagen



Anlage 57: Statistische Verteilung (Anzahl und Prozent) der Geschwindigkeitsänderung der resultierenden Beschleunigung bei einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

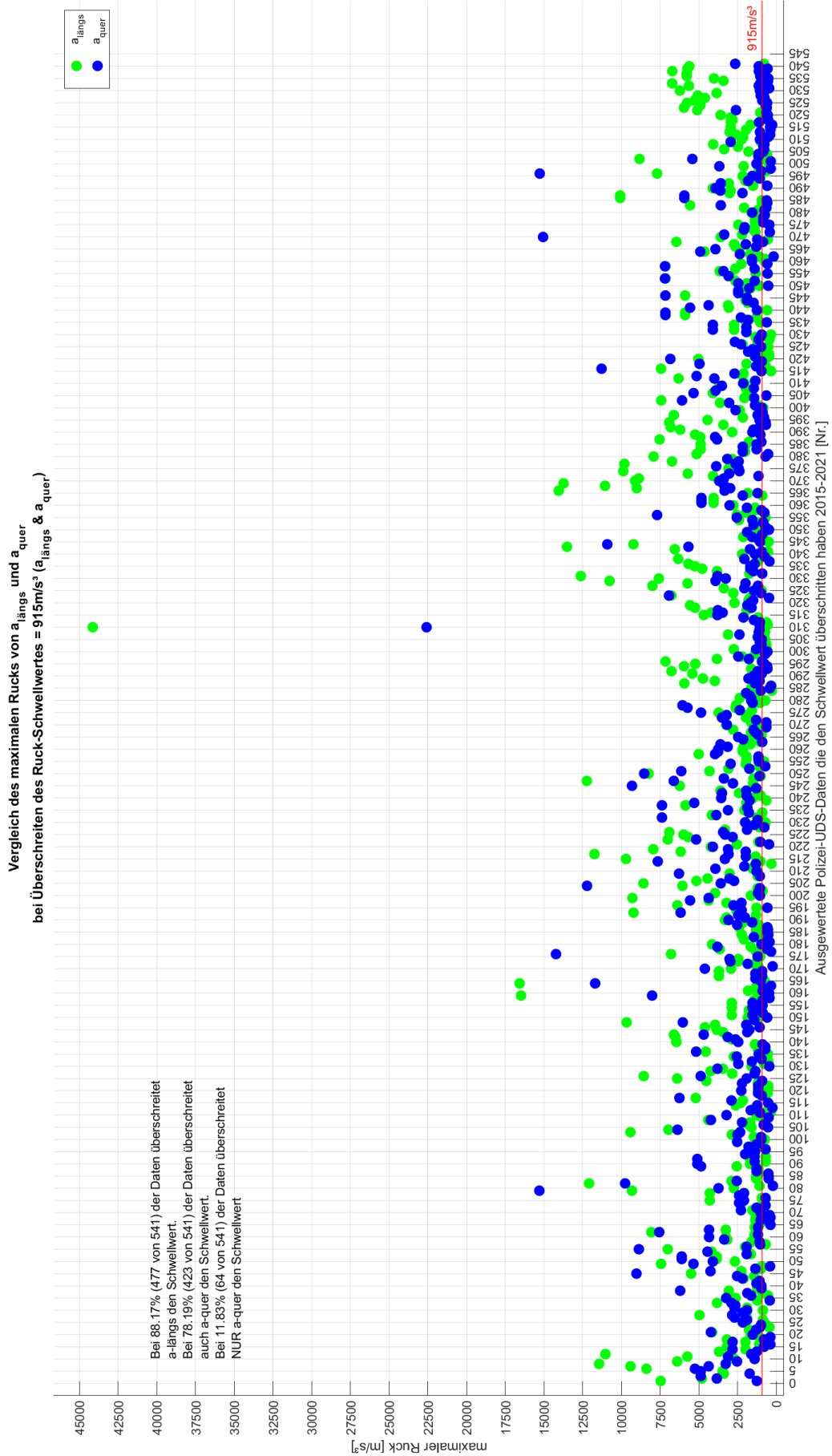


Anlage 58: Prozentuale Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen der resultierenden Beschleunigung beim Überschreiten des Schwellwertes von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

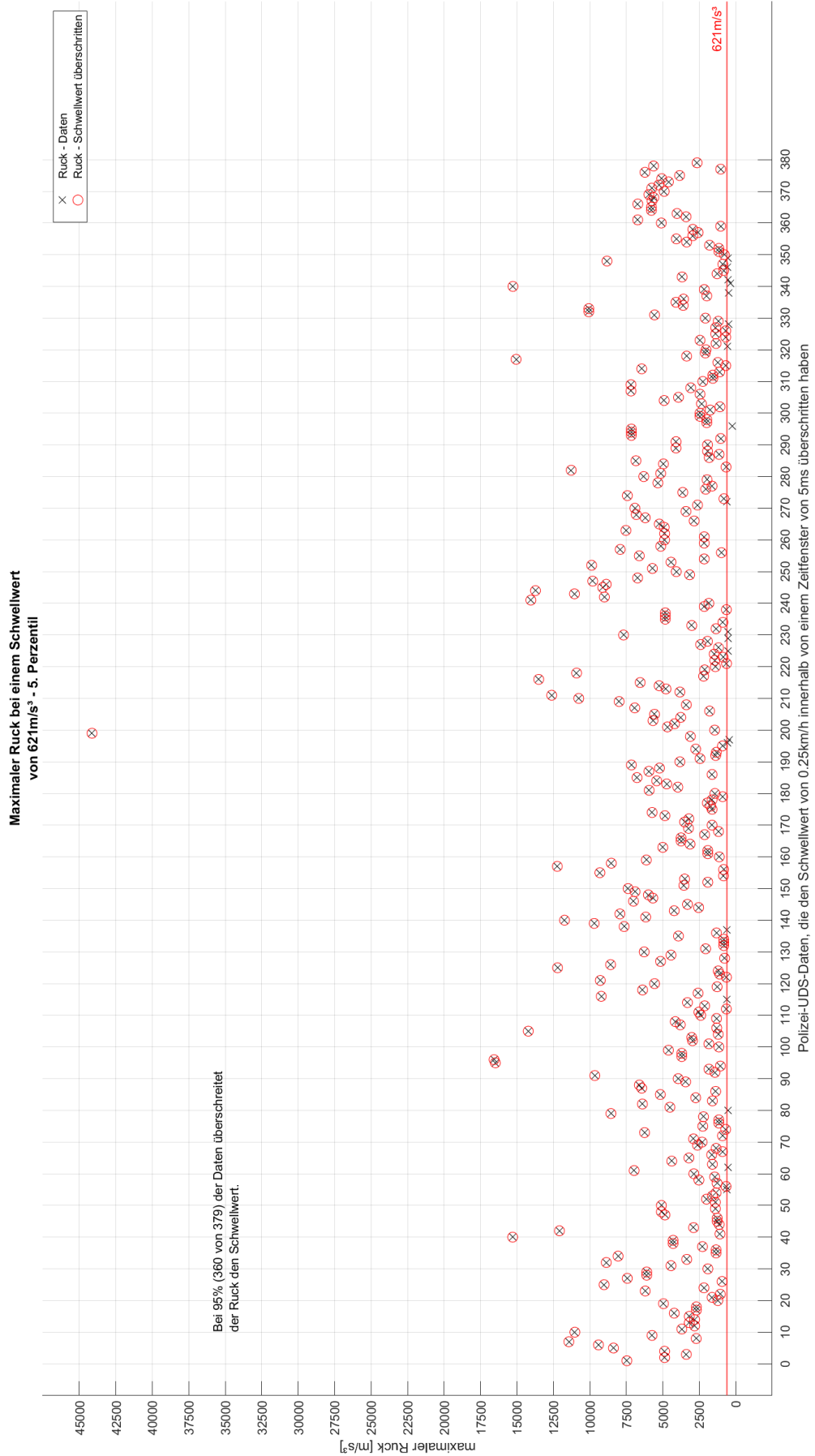


Anlage 59: Auswertung des maximalen Rucks und iterativer Schwellwert – 95. Perzentil (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

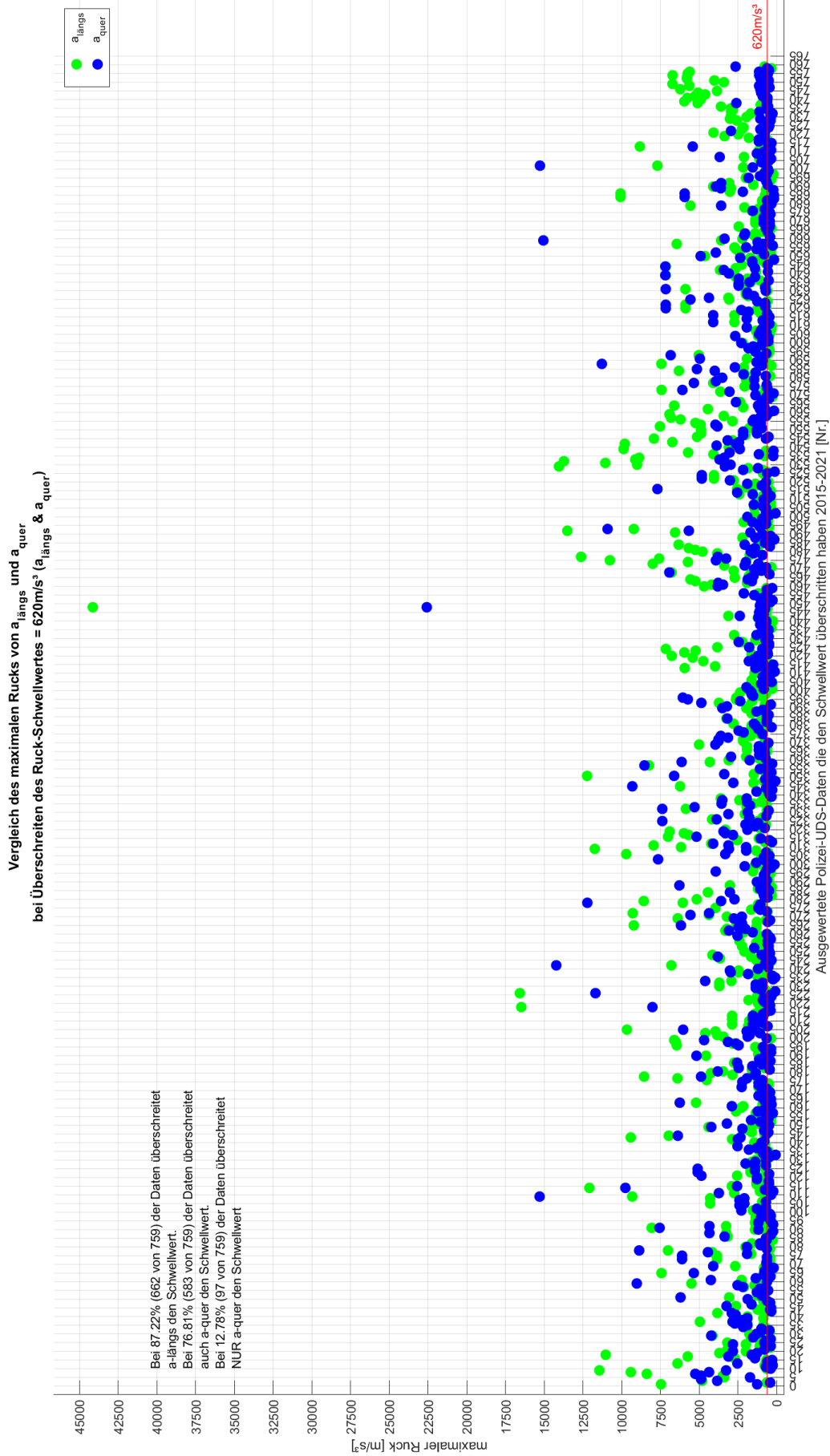
Anlagen



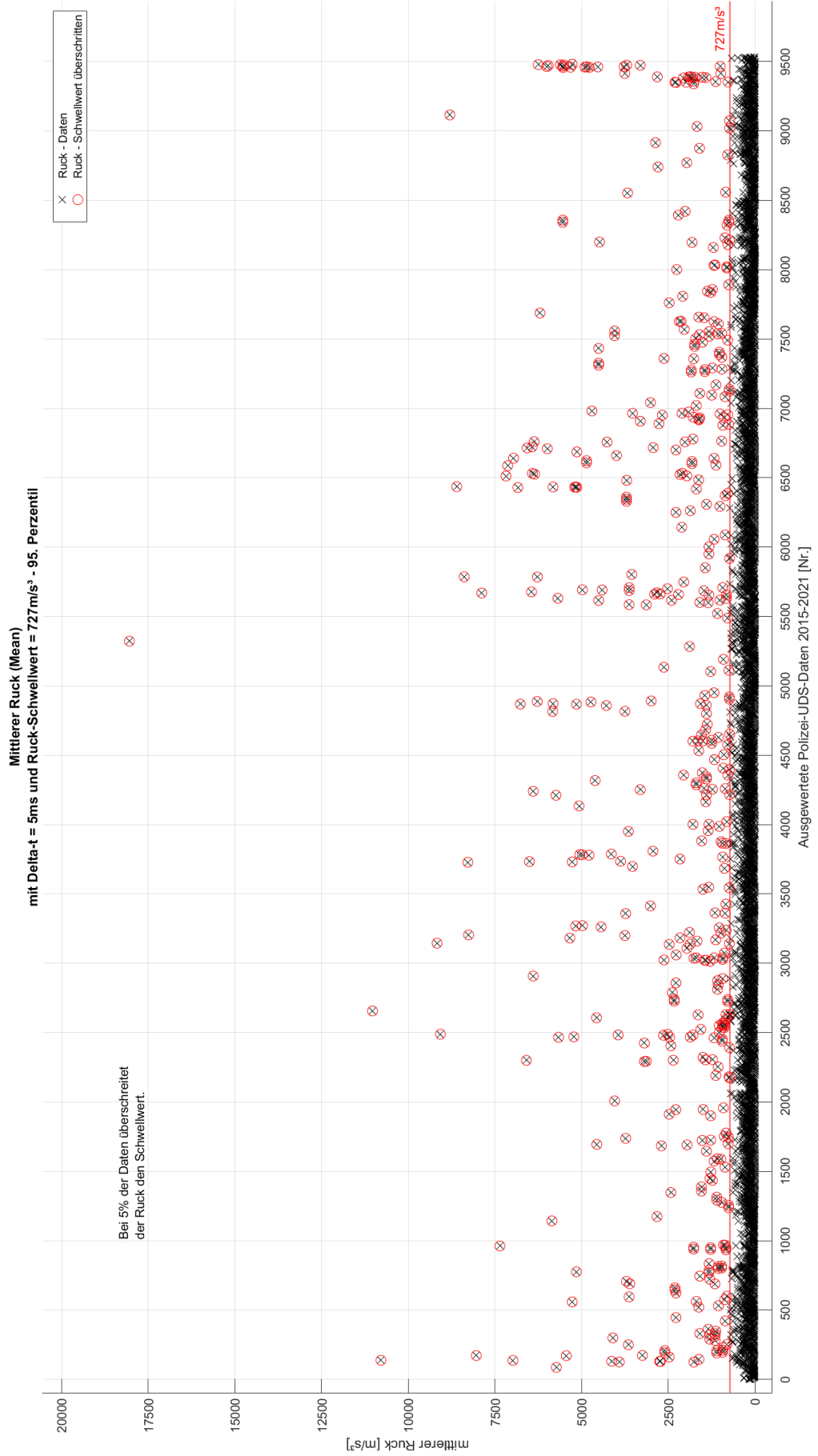
Anlage 60: Vergleich des maximalen Rucks in Langs- und Querrichtung mit einem Schwellwert von 915 m/s^3 (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)



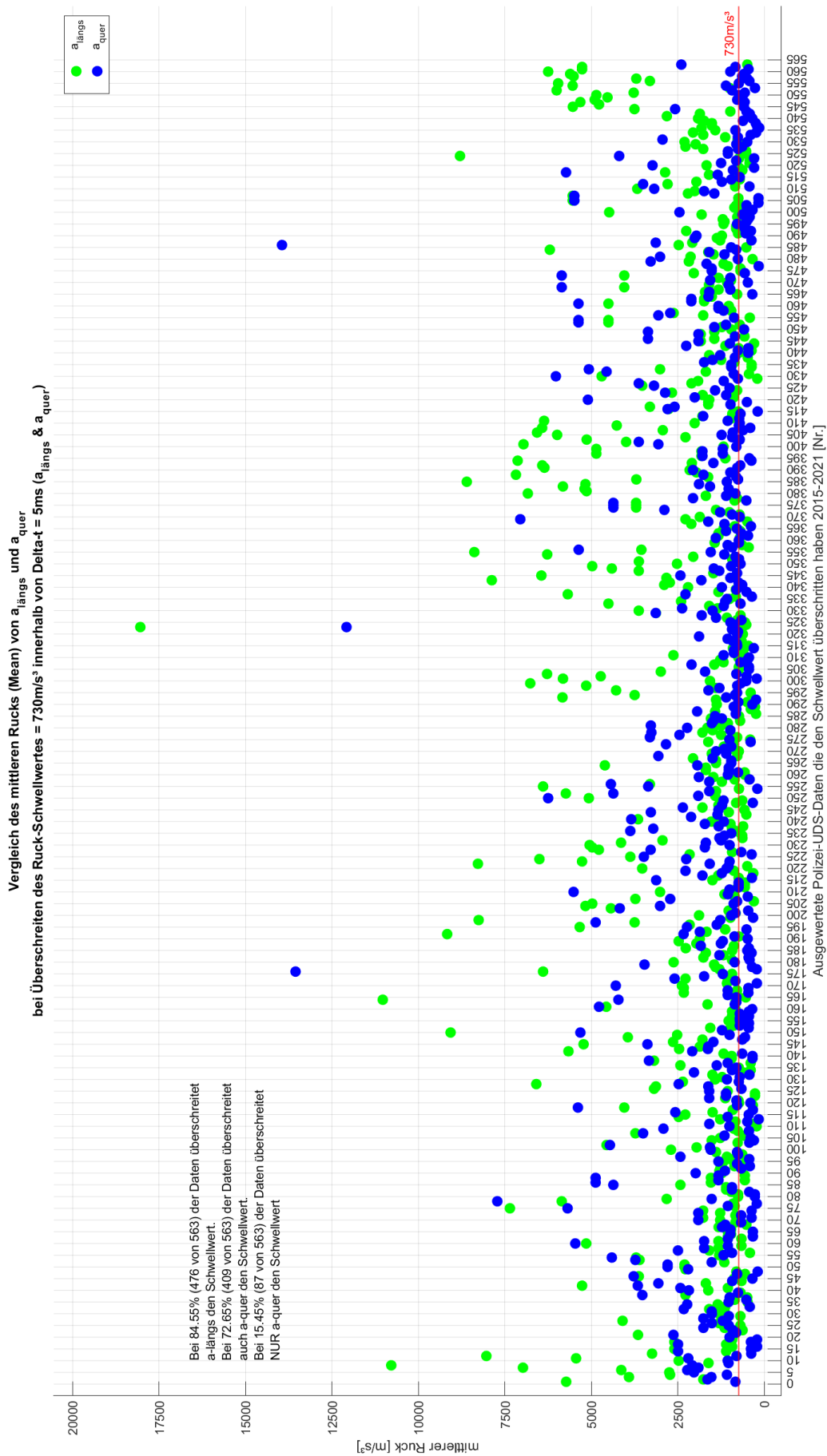
Anlage 61: Auswertung des maximalen Rucks basierend auf den Datensätzen, welche den Schwellwert der Geschwindigkeitsänderung von $0,25\text{ km/h}$ innerhalb von 5 ms erfüllen (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)



Anlage 62: Vergleich des maximalen Rucks in Langs- und Querrichtung mit einem Schwellwert von 620m/s^3 (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)



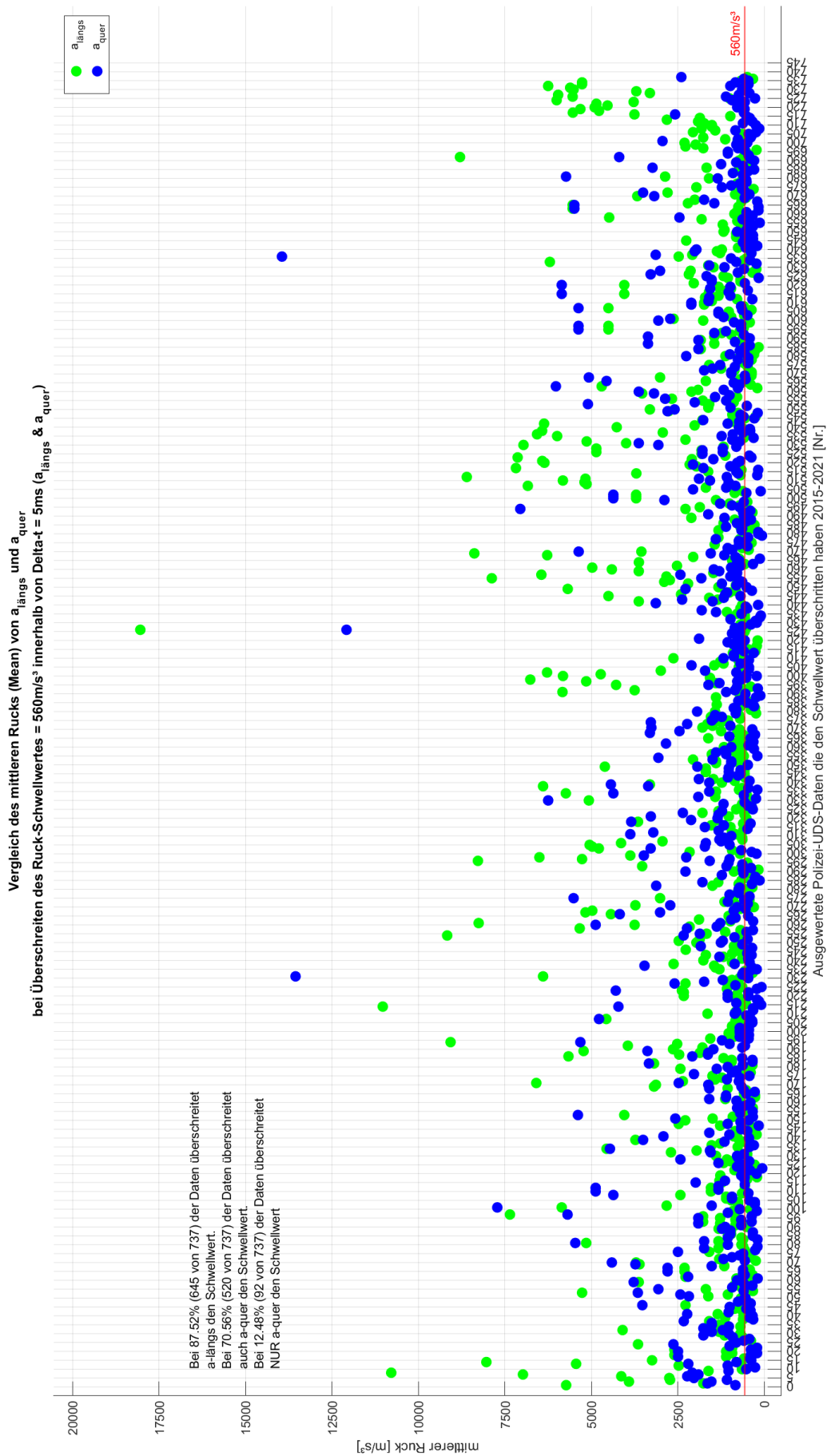
Anlage 63: Auswertung des mittleren Rucks innerhalb von 5 ms und iterativer Schwellwert – 95. Perzentil (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)



Anlage 64: Vergleich des mittleren Rucks innerhalb von 5 ms in Langs- und Querrichtung mit einem Schwellwert von 730 m/s^3 (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

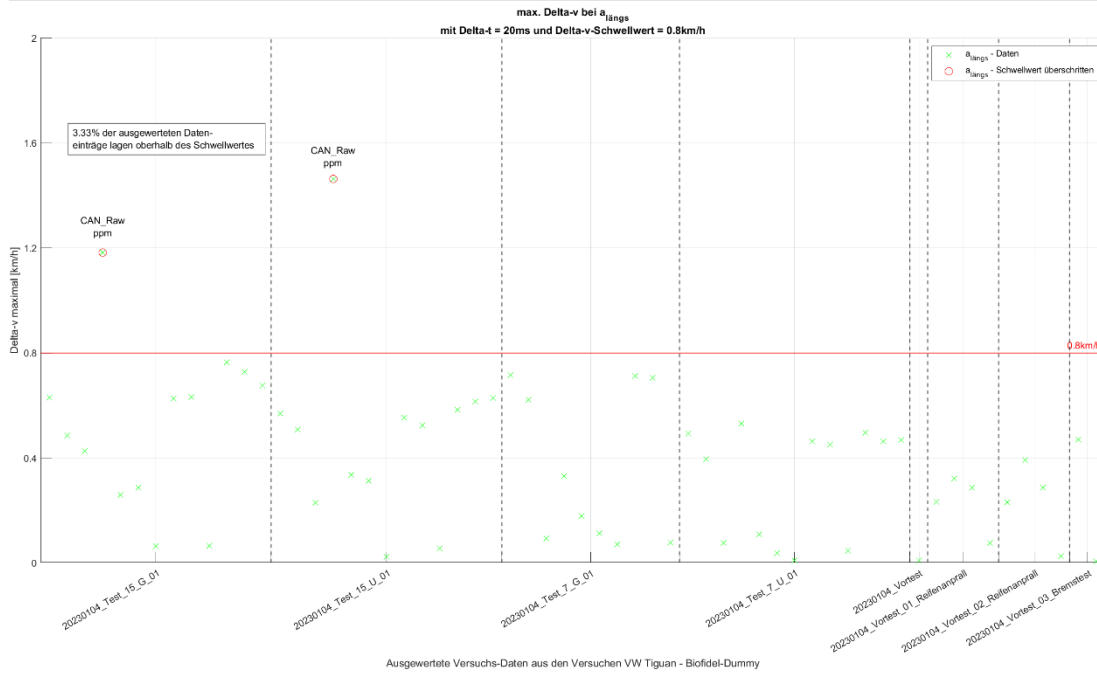


Anlage 65: Auswertung des mittleren Rucks innerhalb von 5 ms basierend auf den Datensätzen, welche den Schwellwert der Geschwindigkeitsänderung von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms erfüllen (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

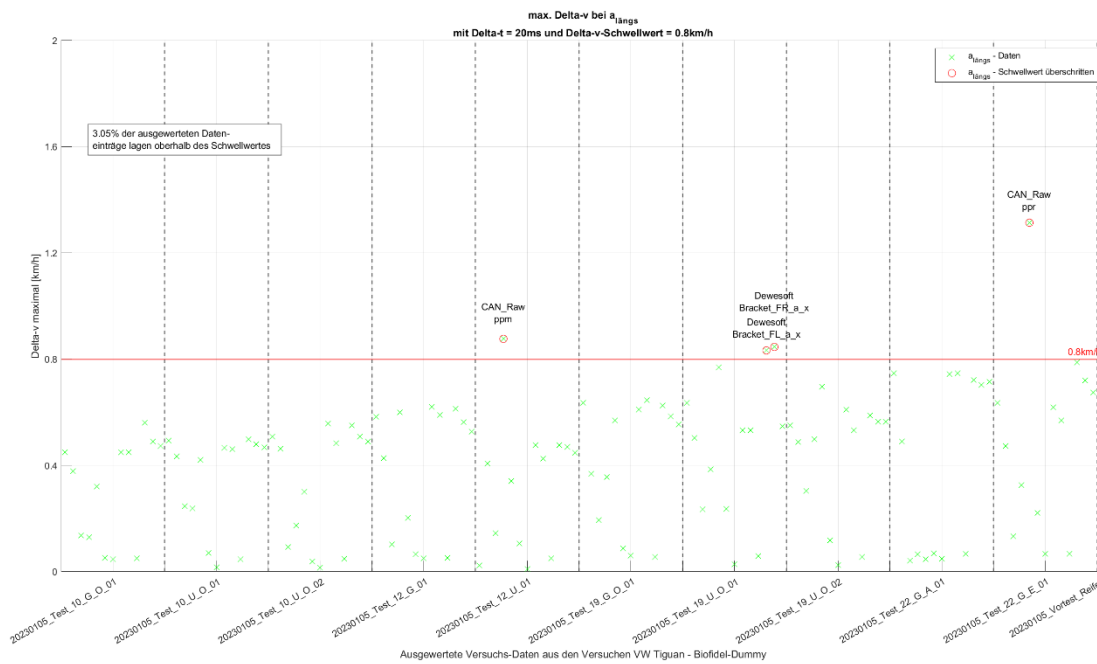


Anlage 66: Vergleich des mittleren Rucks innerhalb von 5 ms in Langs- und Querrichtung mit einem Schwellwert von 560 m/s^3 (Datensätze Polizei Berlin - mit Interpolation)

Anlagen

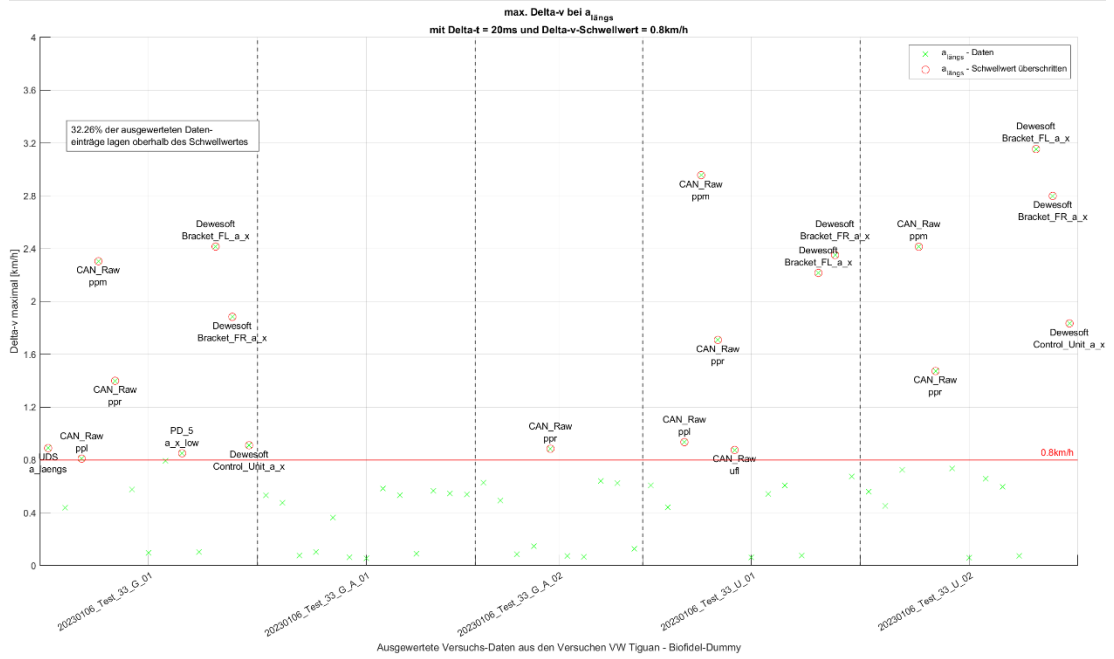


Anlage 68: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 1 - mit Up- und Downsampling)



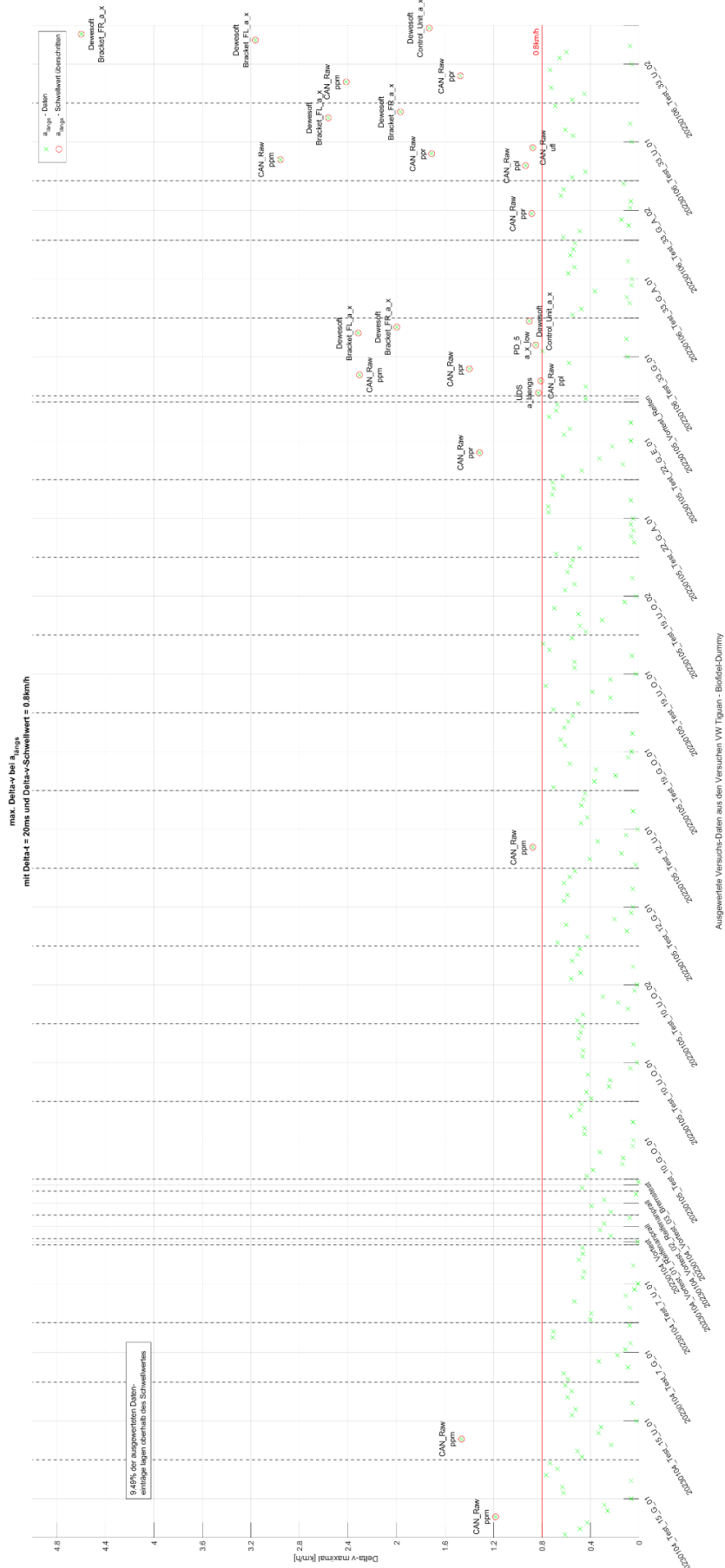
Anlage 69: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 2 - mit Up- und Downsampling)

Anlagen



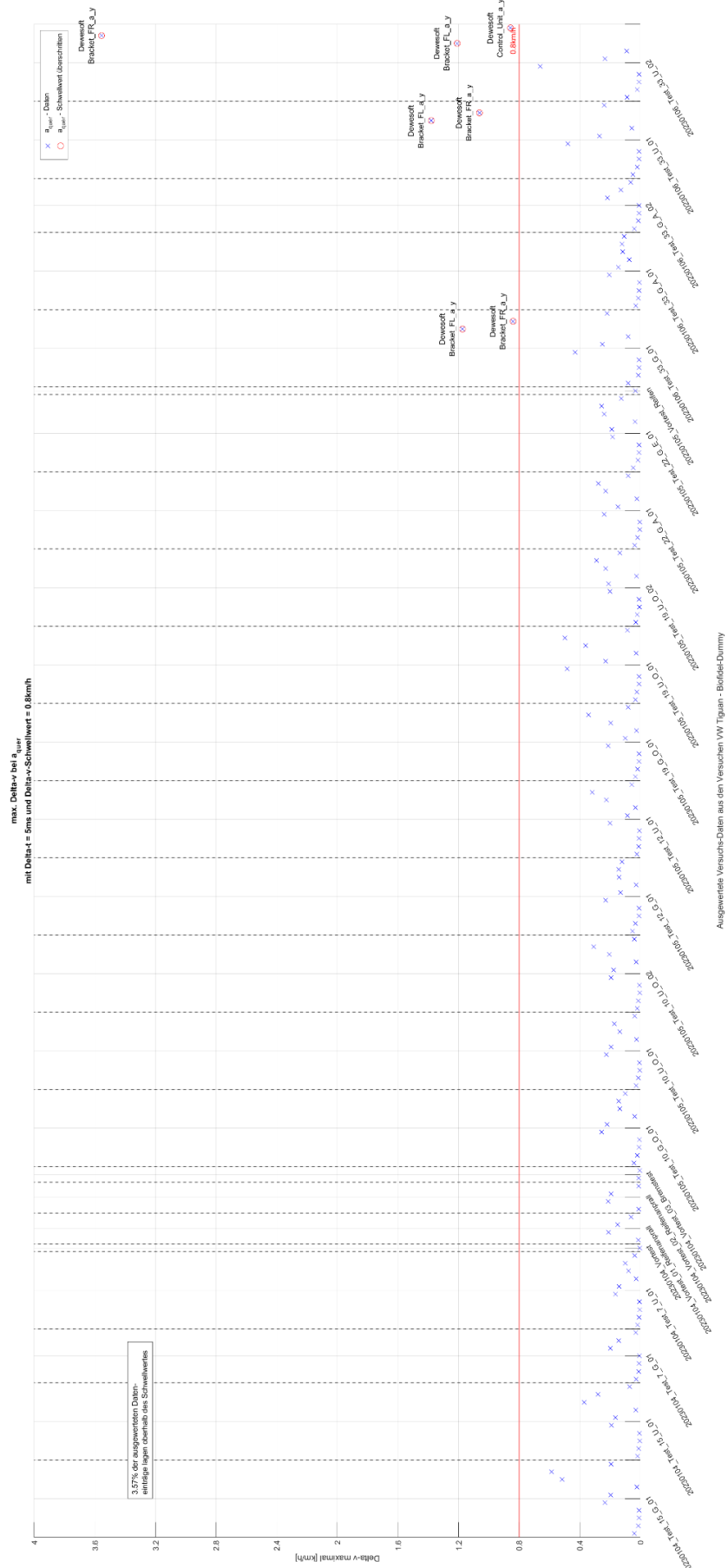
Anlage 70: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 3 - mit Up- und Downsampling)

Anlagen



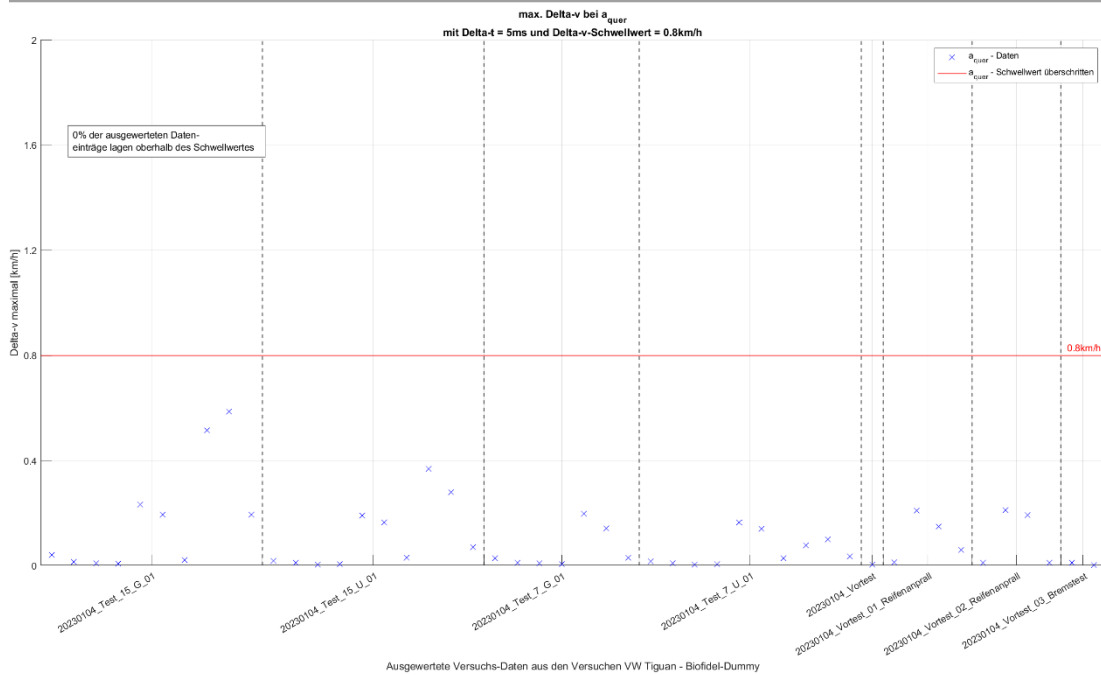
Anlage 71: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - ohne Up- und Downsampling)

Anlagen

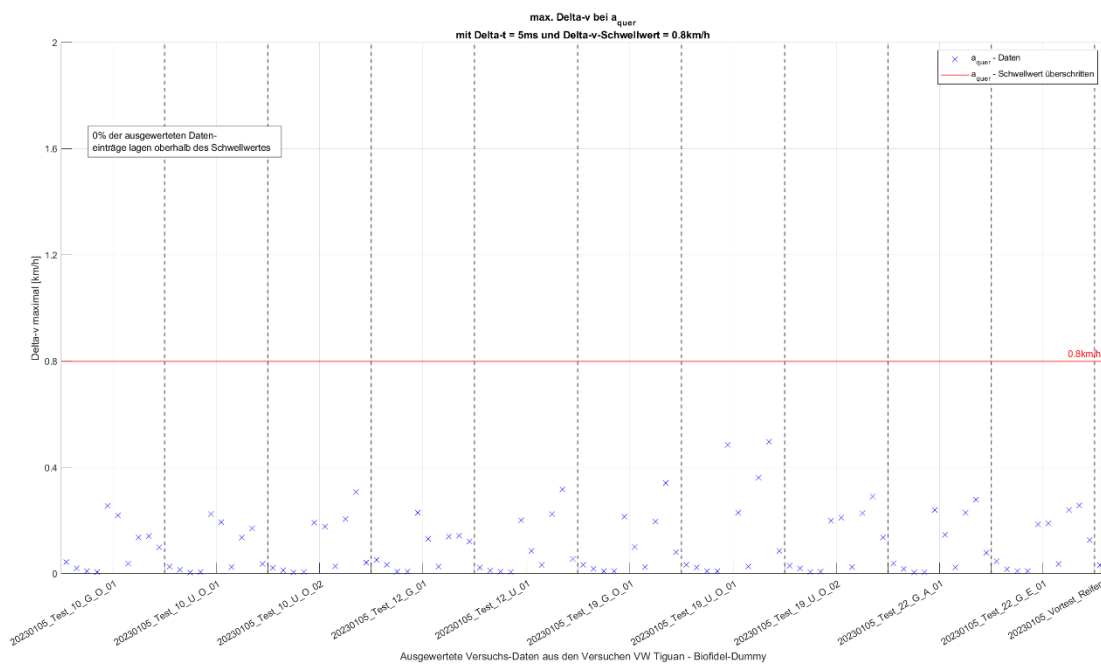


Anlage 72: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - mit Up- und Downsampling)

Anlagen

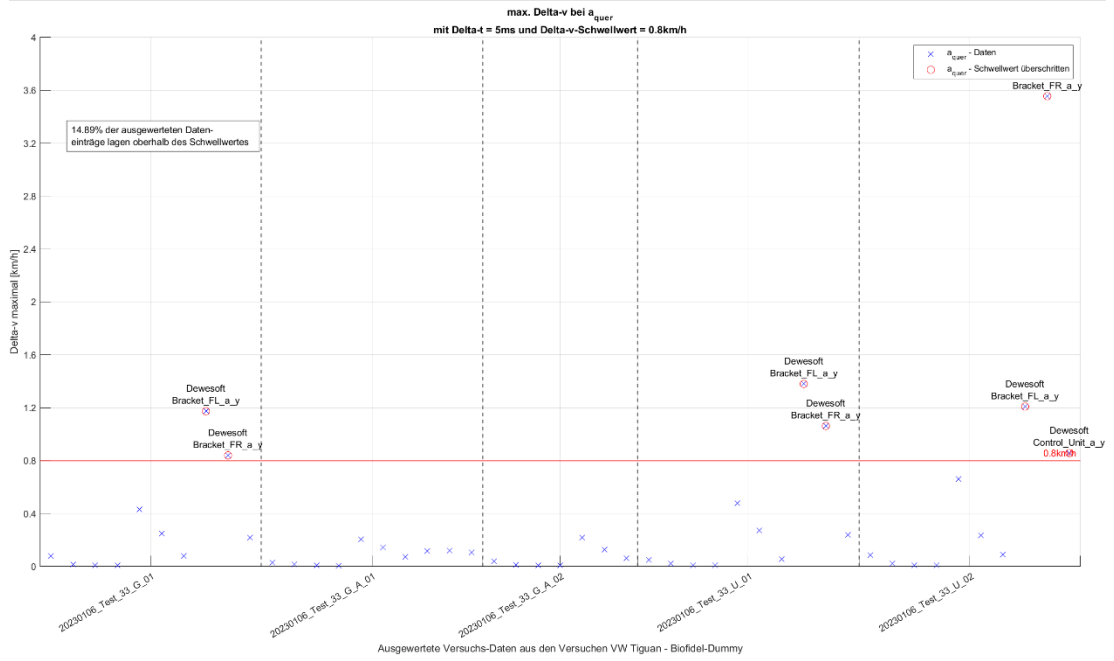


Anlage 73: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 1 - mit Up- und Downsampling)



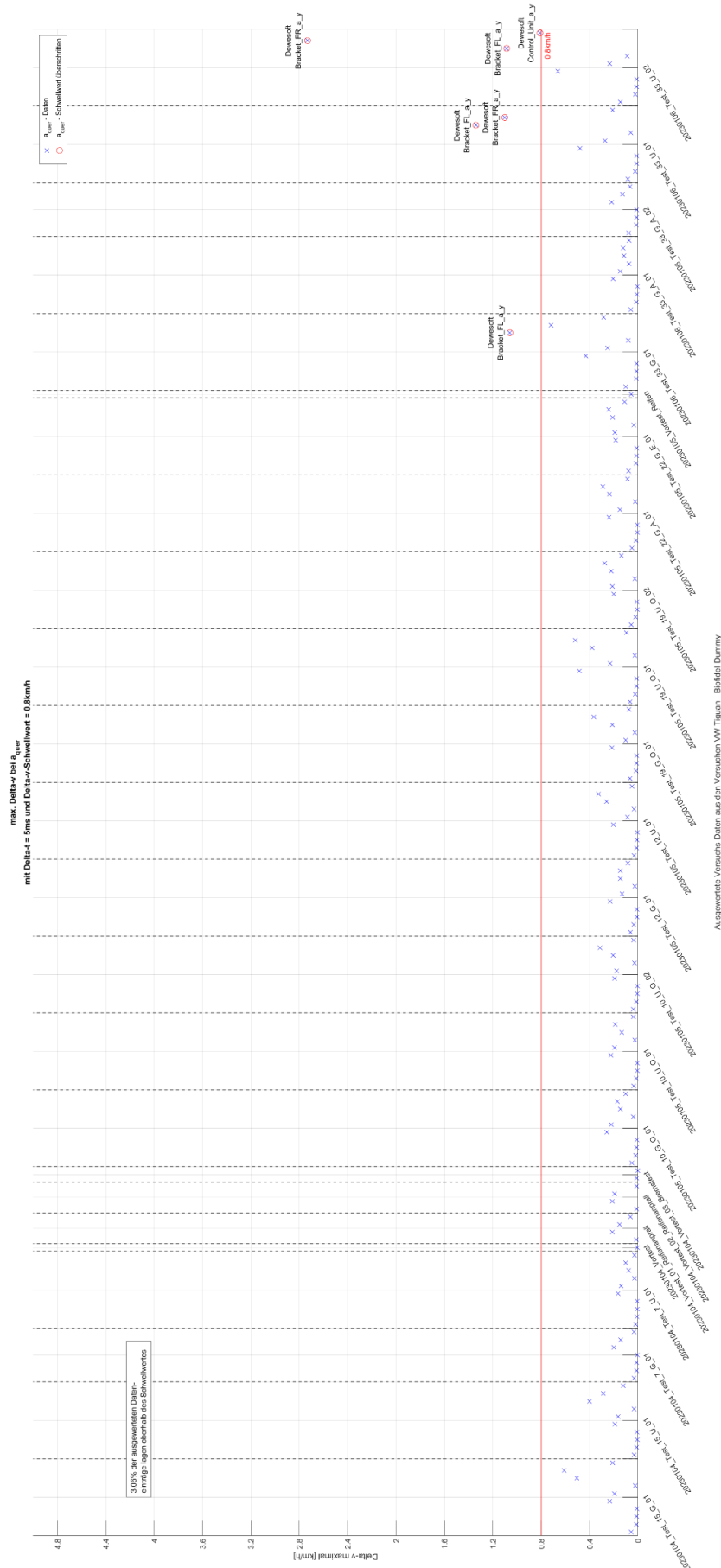
Anlage 74: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 2 - mit Up- und Downsampling)

Anlagen



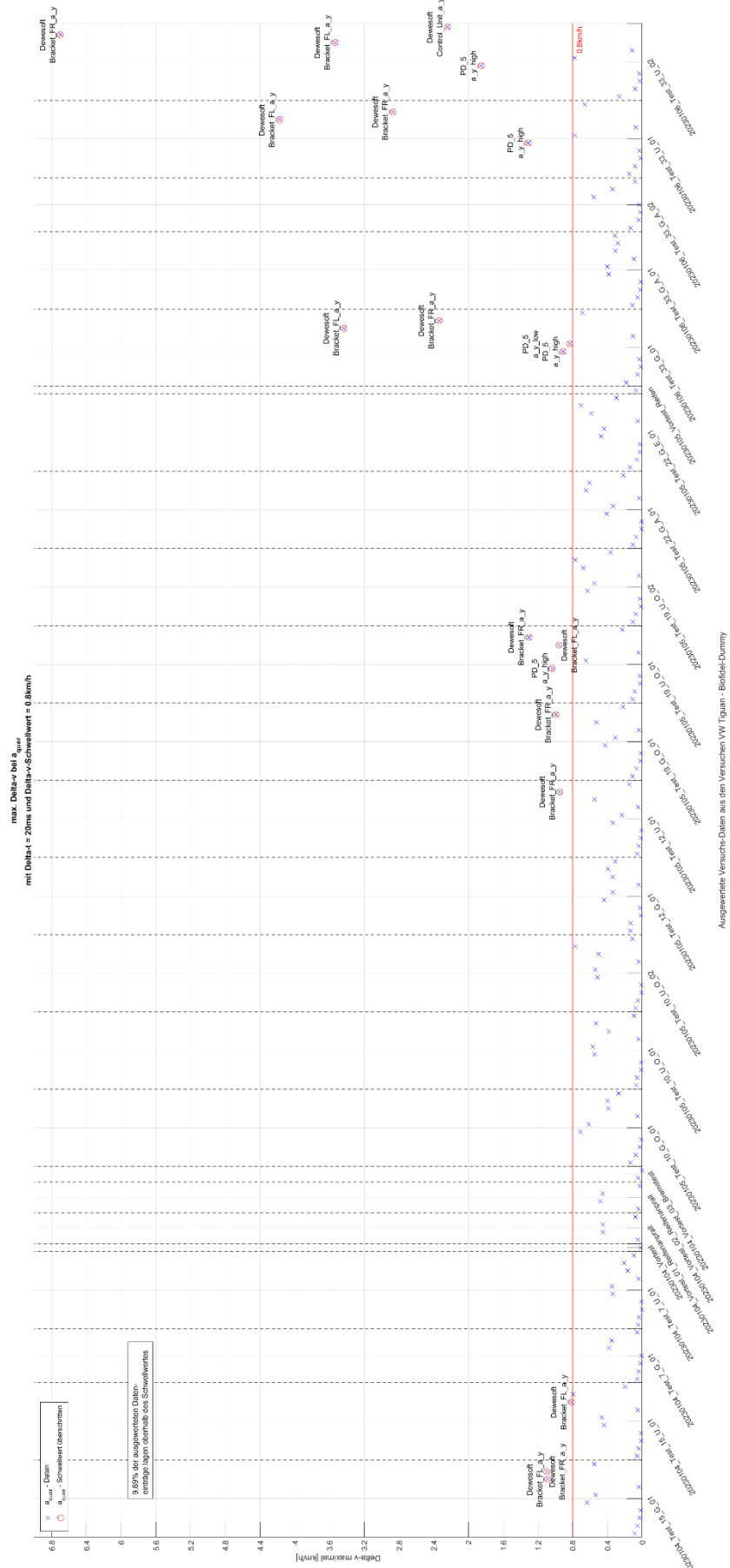
Anlage 75: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von $0,8\text{ km/h}$ innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 3 - mit Up- und Downsampling)

Anlagen



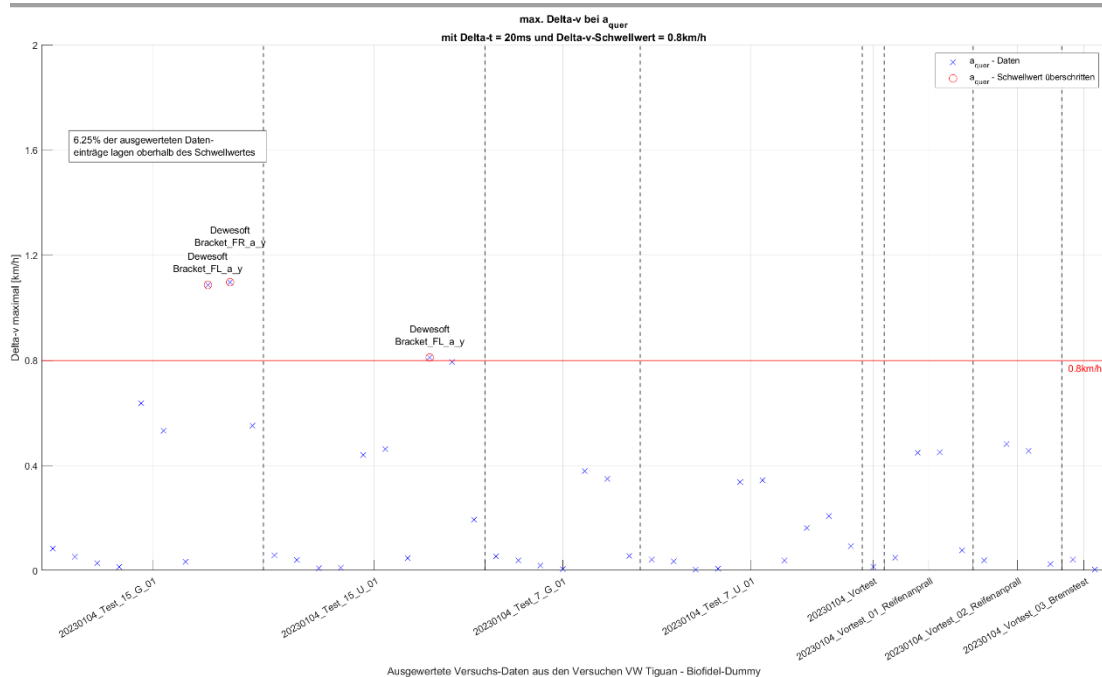
Anlage 76: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - ohne Up- und Downsampling)

Anlagen

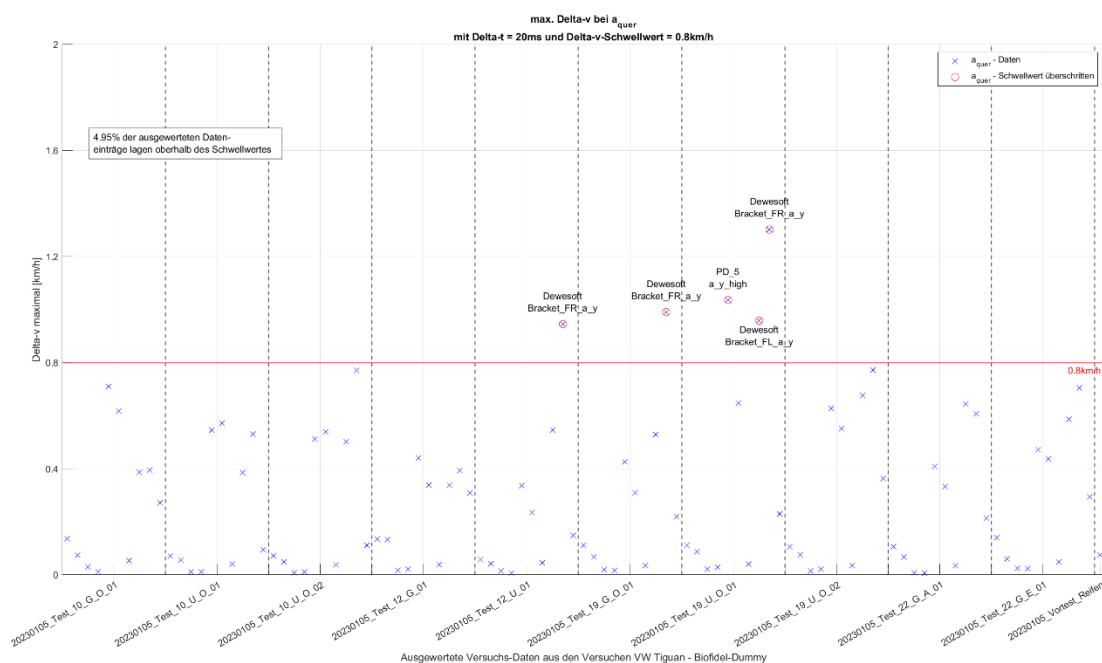


Anlage 77: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - mit Up- und Downsampling)

Anlagen

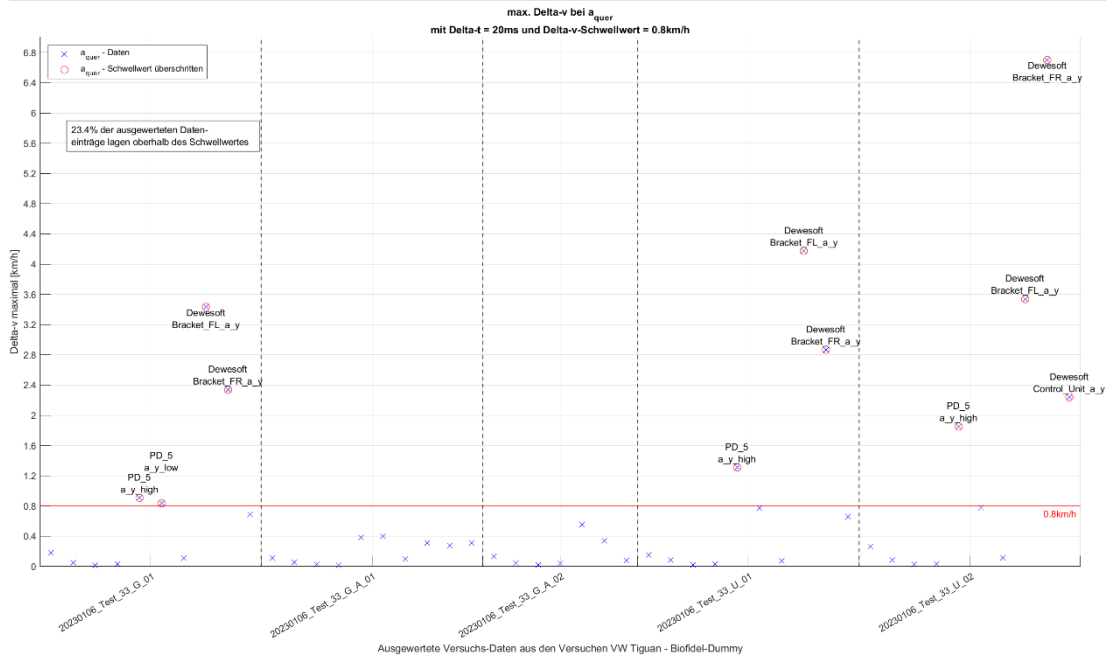


Anlage 78: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 1 - mit Up- und Downsampling)



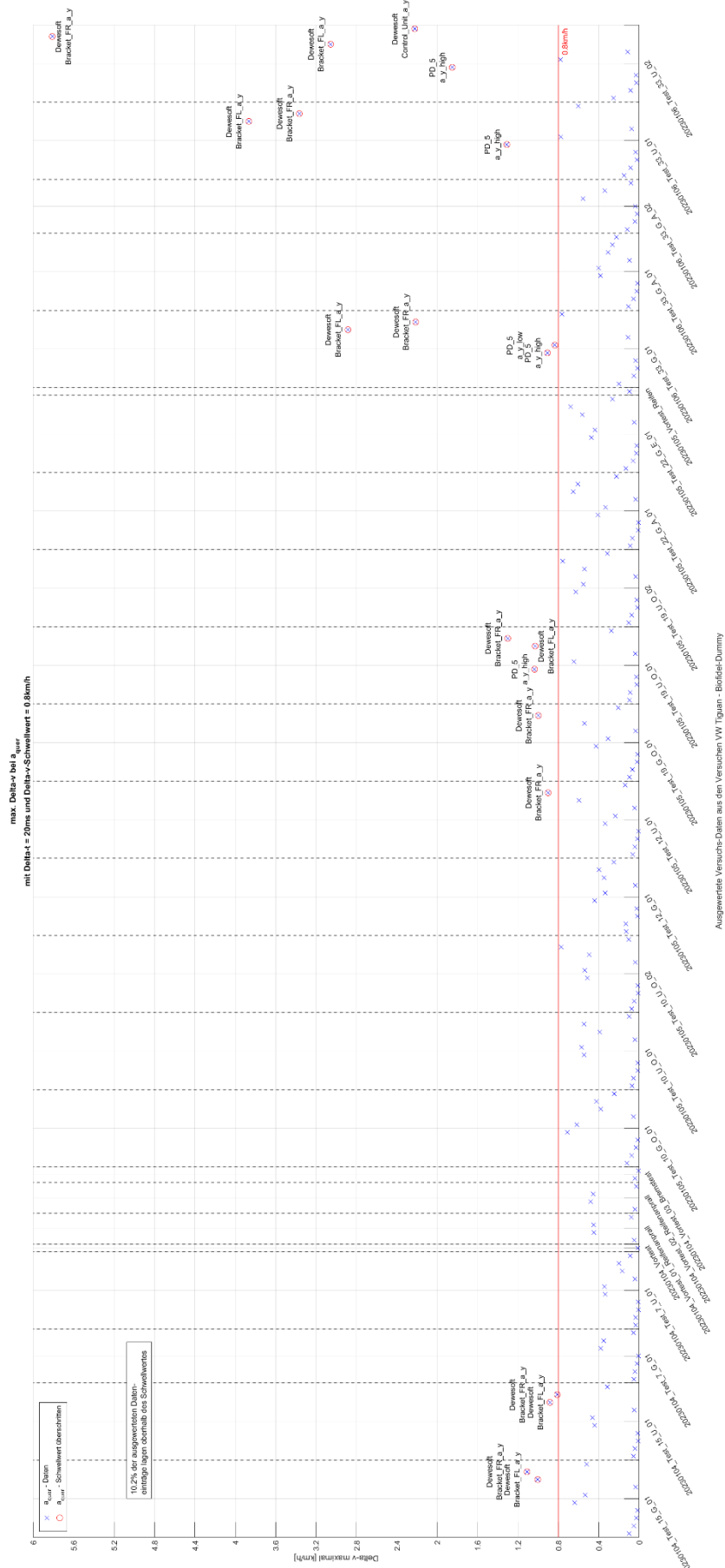
Anlage 79: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 2 - mit Up- und Downsampling)

Anlagen



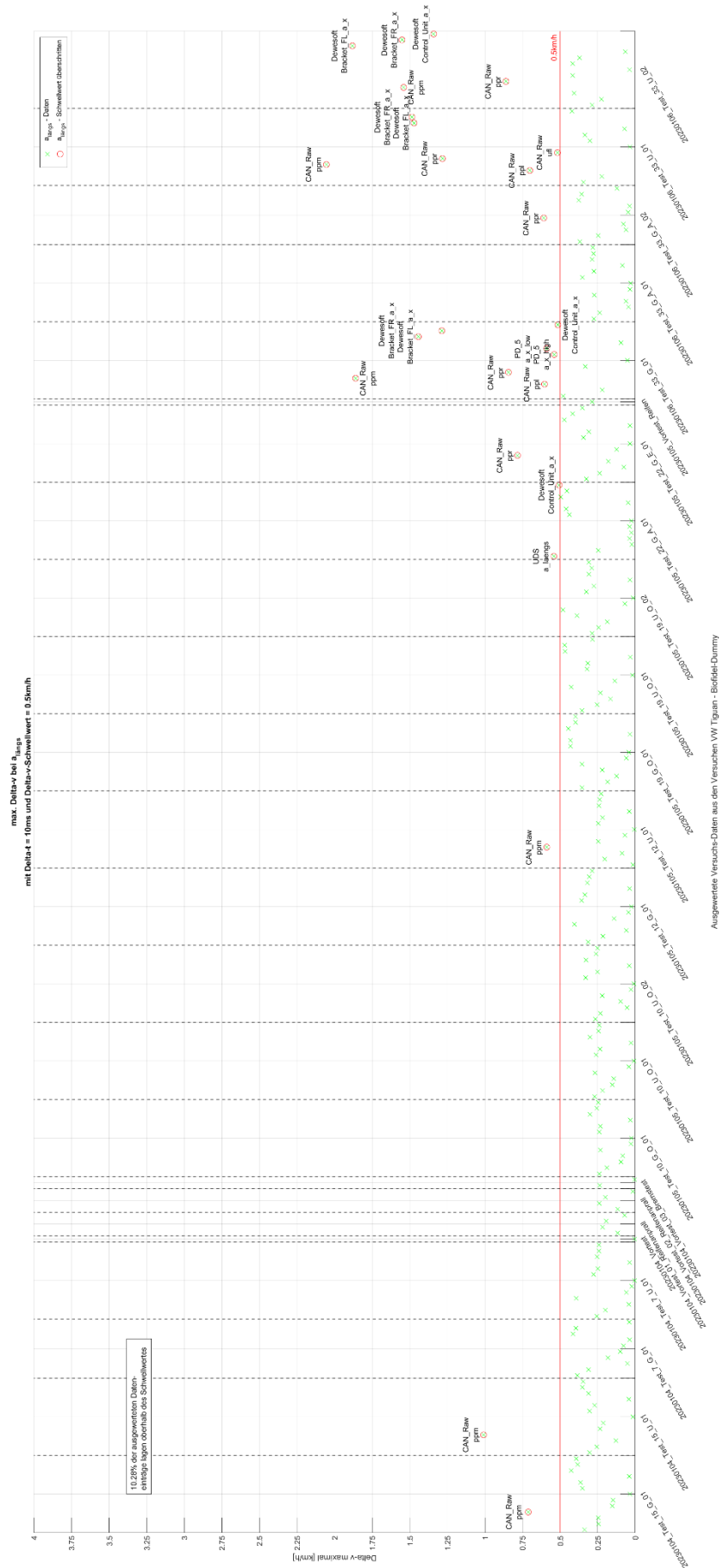
Anlage 80: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 3 - mit Up- und Downsampling)

Anlagen



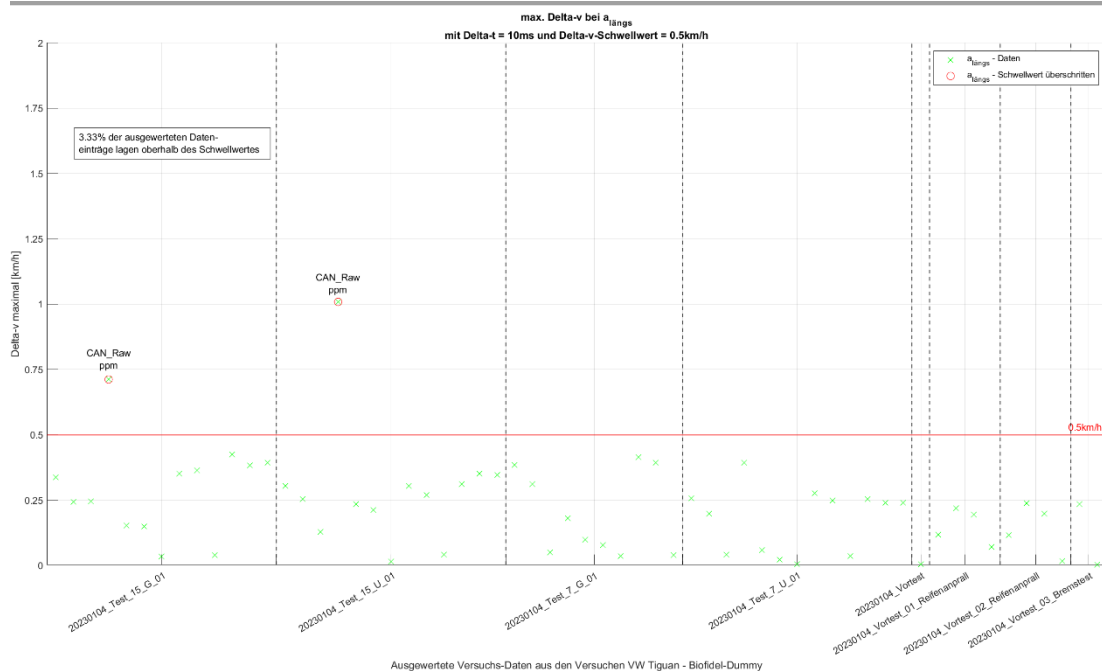
Anlage 81: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - ohne Up- und Downsampling)

Anlagen

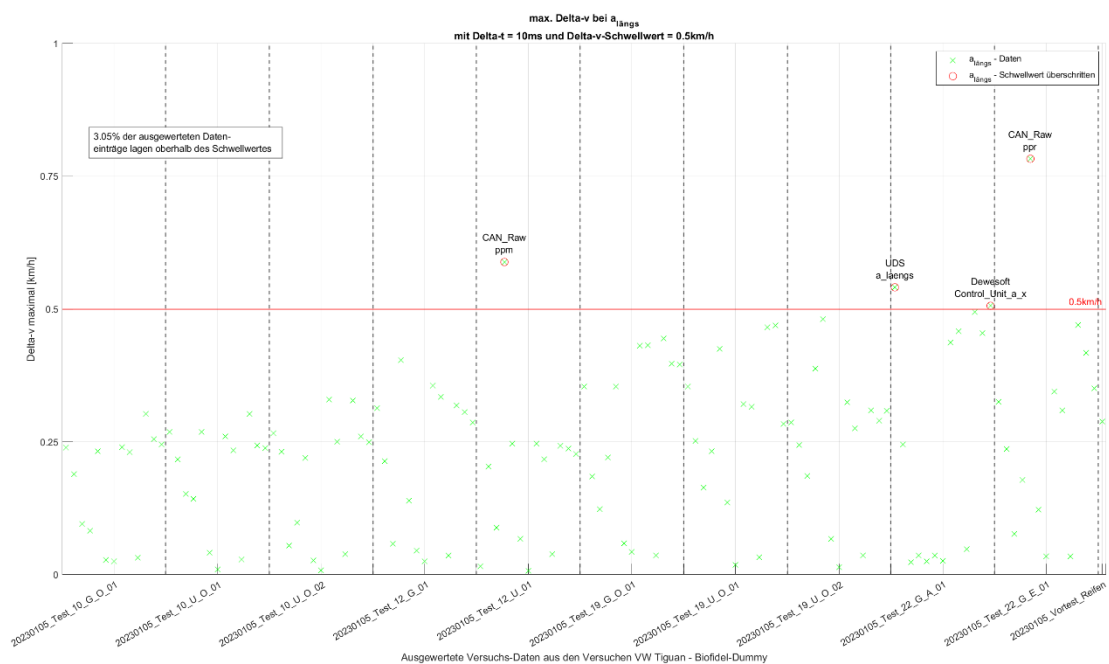


Anlage 82: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - mit Up- und Downsampling)

Anlagen

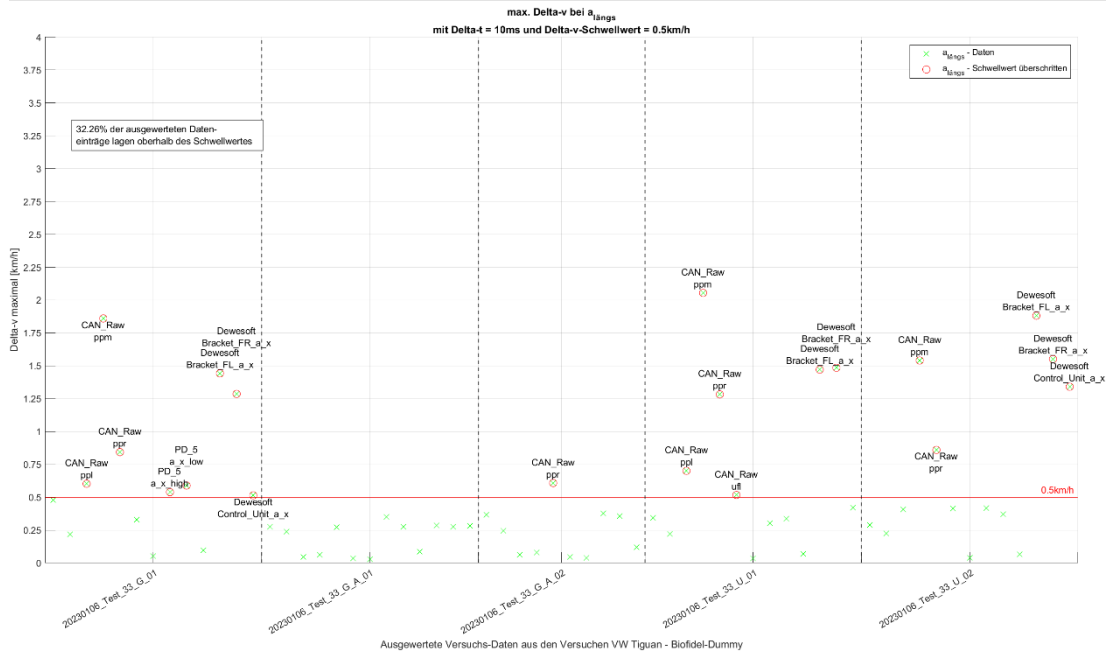


Anlage 83: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 1 - mit Up- und Downsampling)



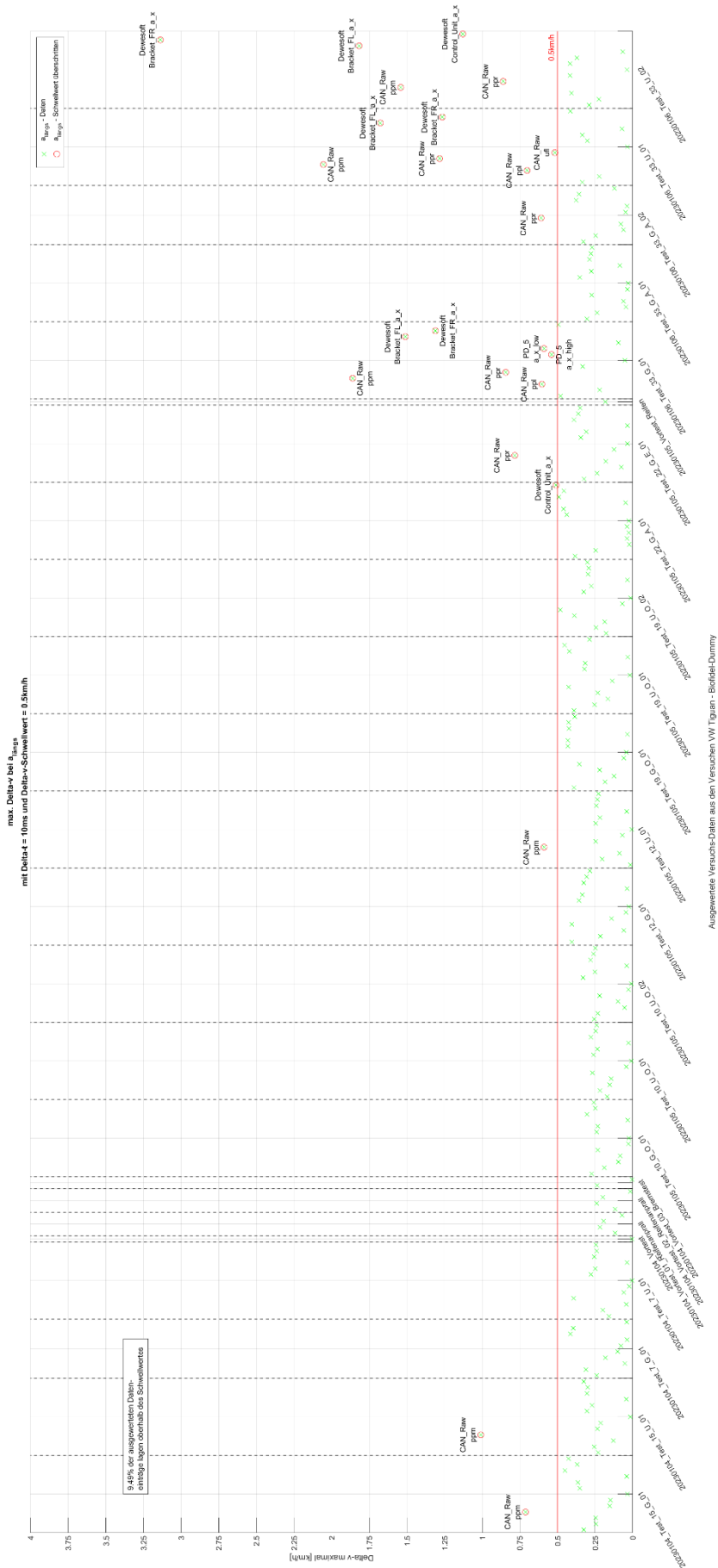
Anlage 84: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 2 - mit Up- und Downsampling)

Anlagen



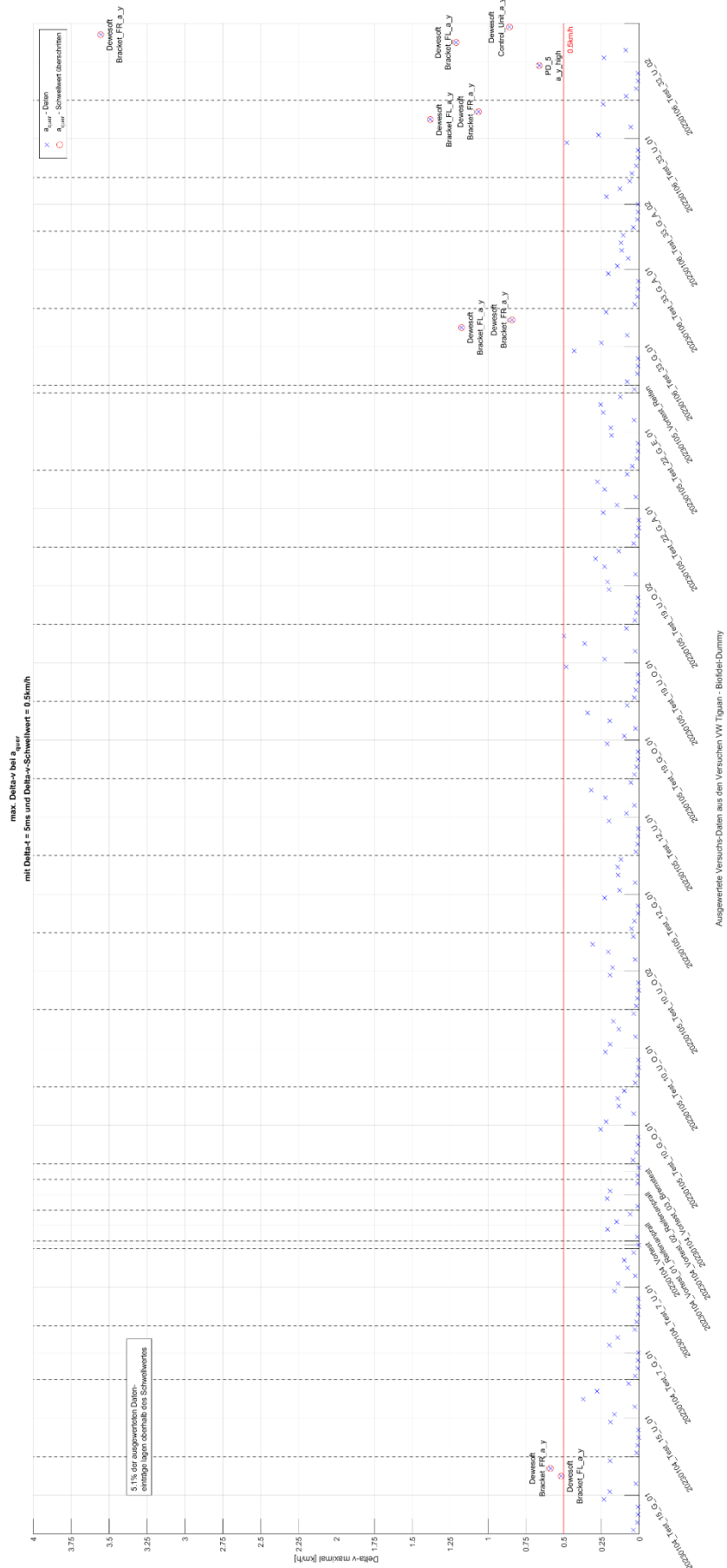
Anlage 85: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 3 - mit Up- und Downsampling)

Anlagen



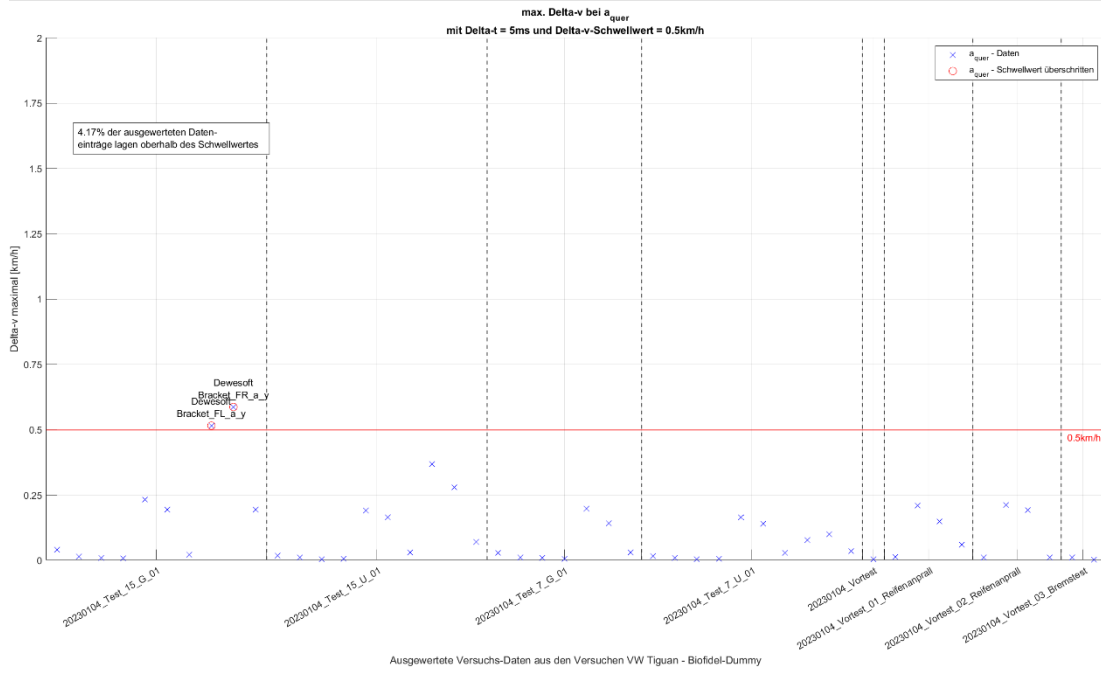
Anlage 86: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - ohne Up- und Downsampling)

Anlagen

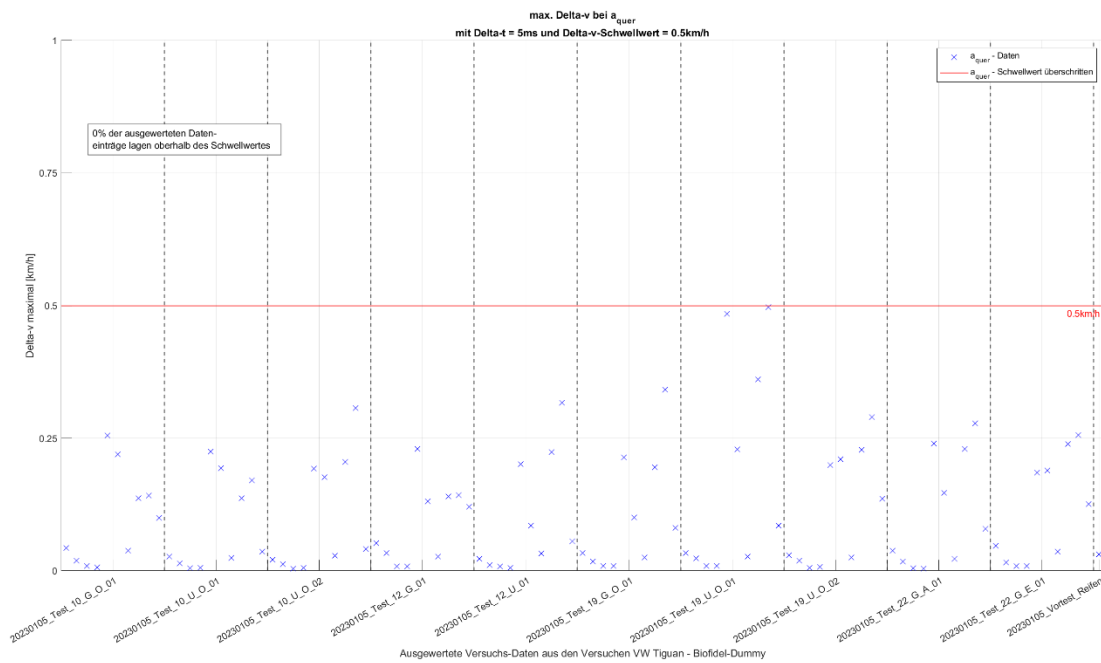


Anlage 87: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem BiOfidel-Dummy - mit Up- und Downsampling)

Anlagen

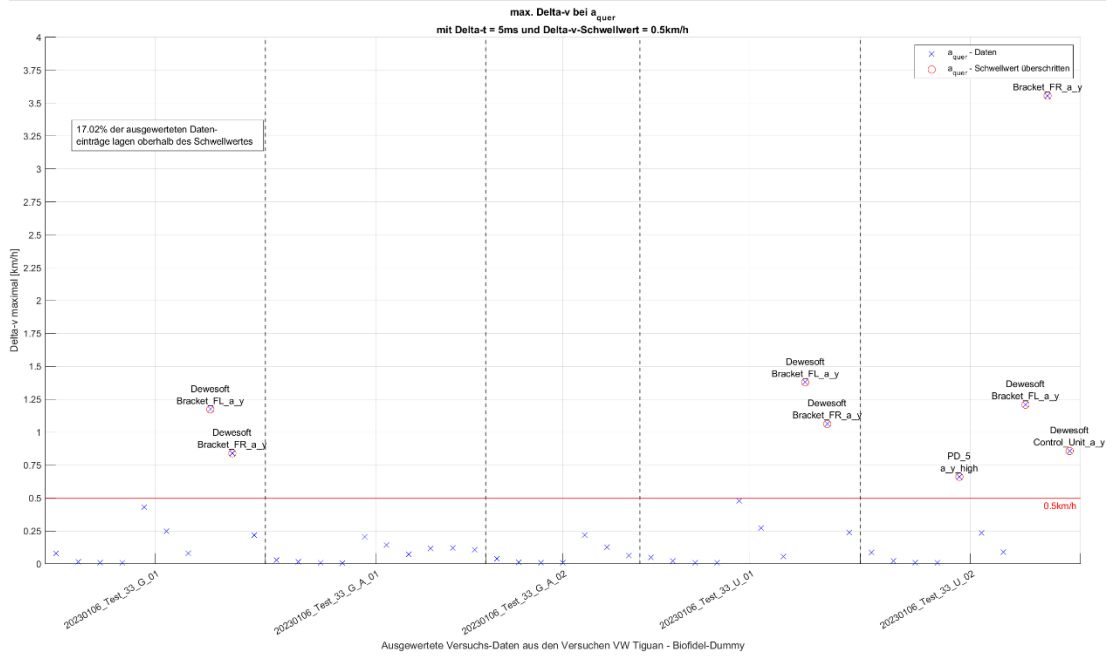


Anlage 88: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von $0,5\text{ km/h}$ innerhalb von 5 ms
(Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 1 - mit Up- und Downsampling)



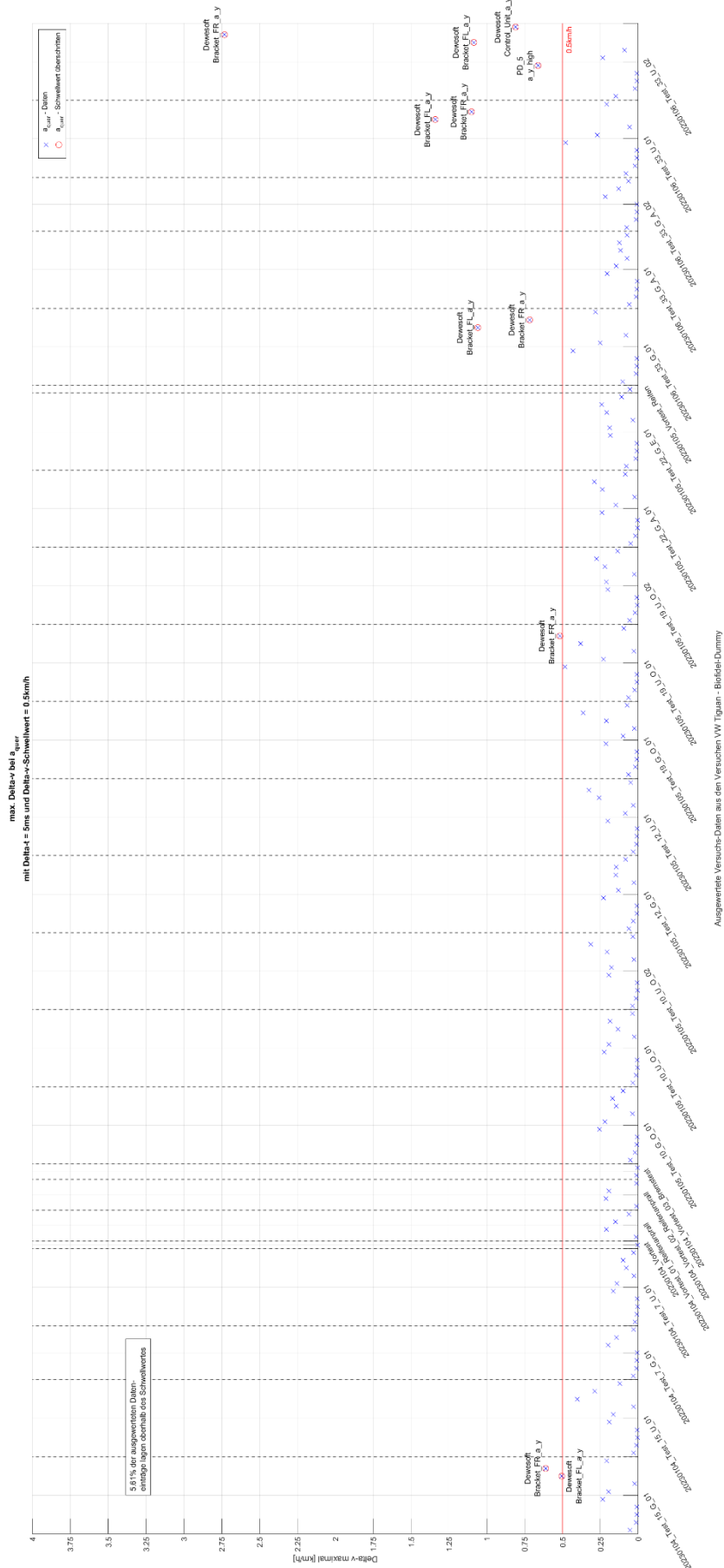
Anlage 89: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von $0,5\text{ km/h}$ innerhalb von 5 ms
(Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 2 - mit Up- und Downsampling)

Anlagen

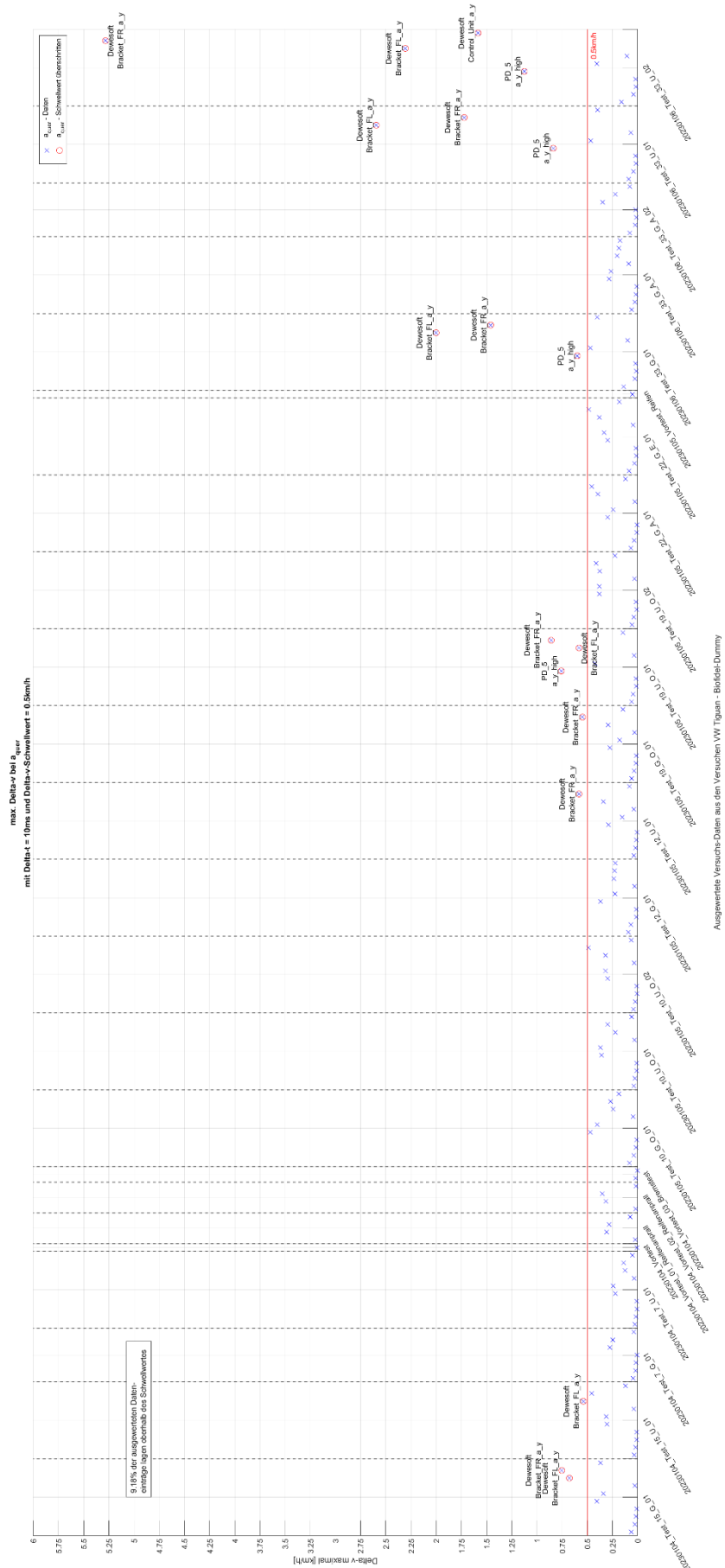


Anlage 90: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 3 - mit Up- und Downsampling)

Anlagen

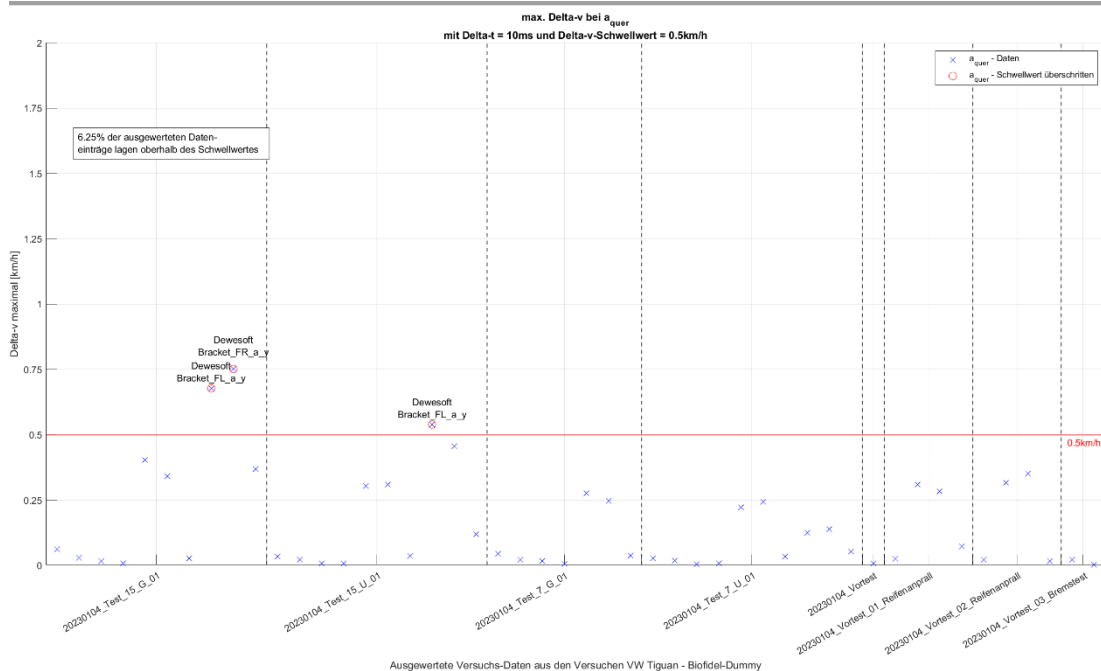


Anlage 91: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - ohne Up- und Downsampling)

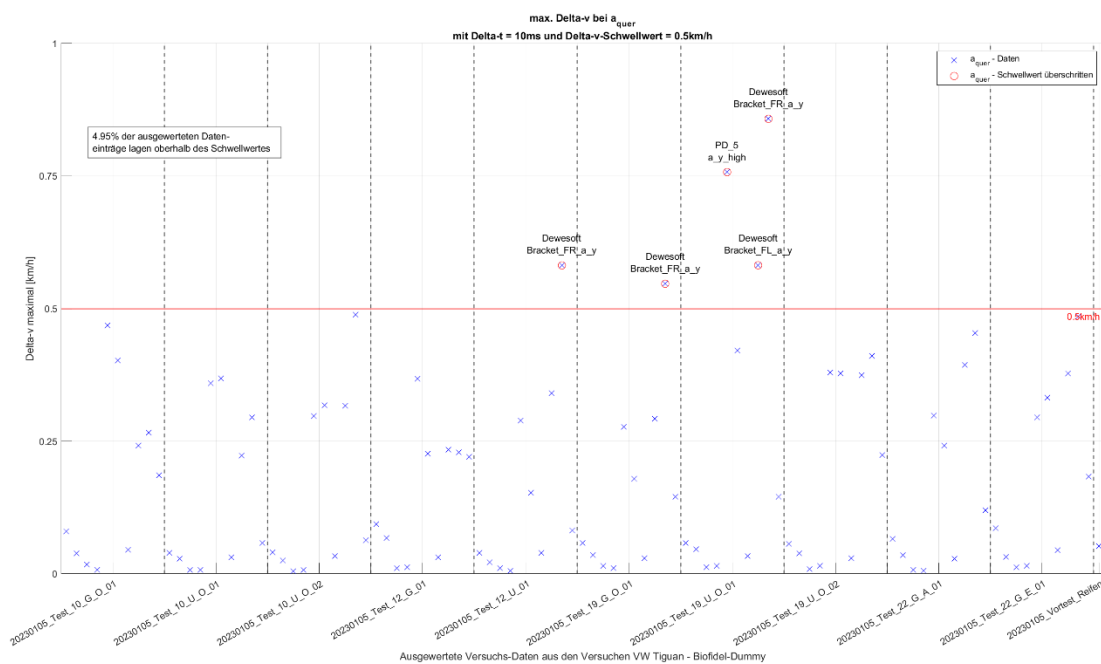


Anlage 92: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - mit Up- und Downsampling)

Anlagen

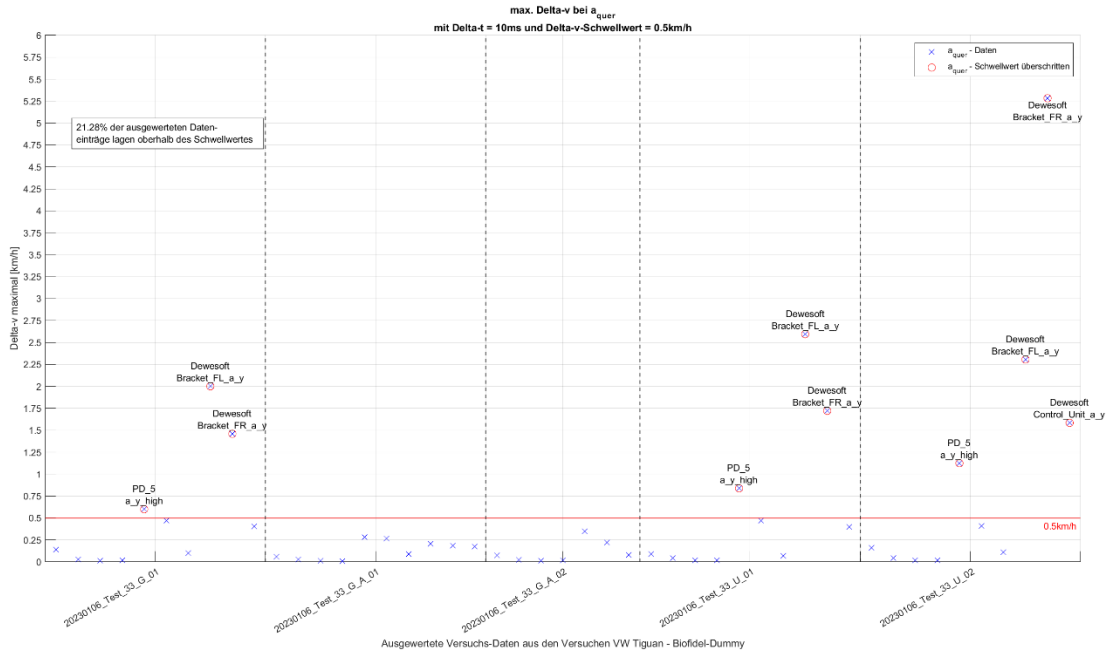


Anlage 93: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von $0,5\text{ km/h}$ innerhalb von 10 ms
(Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 1 - mit Up- und Downsampling)



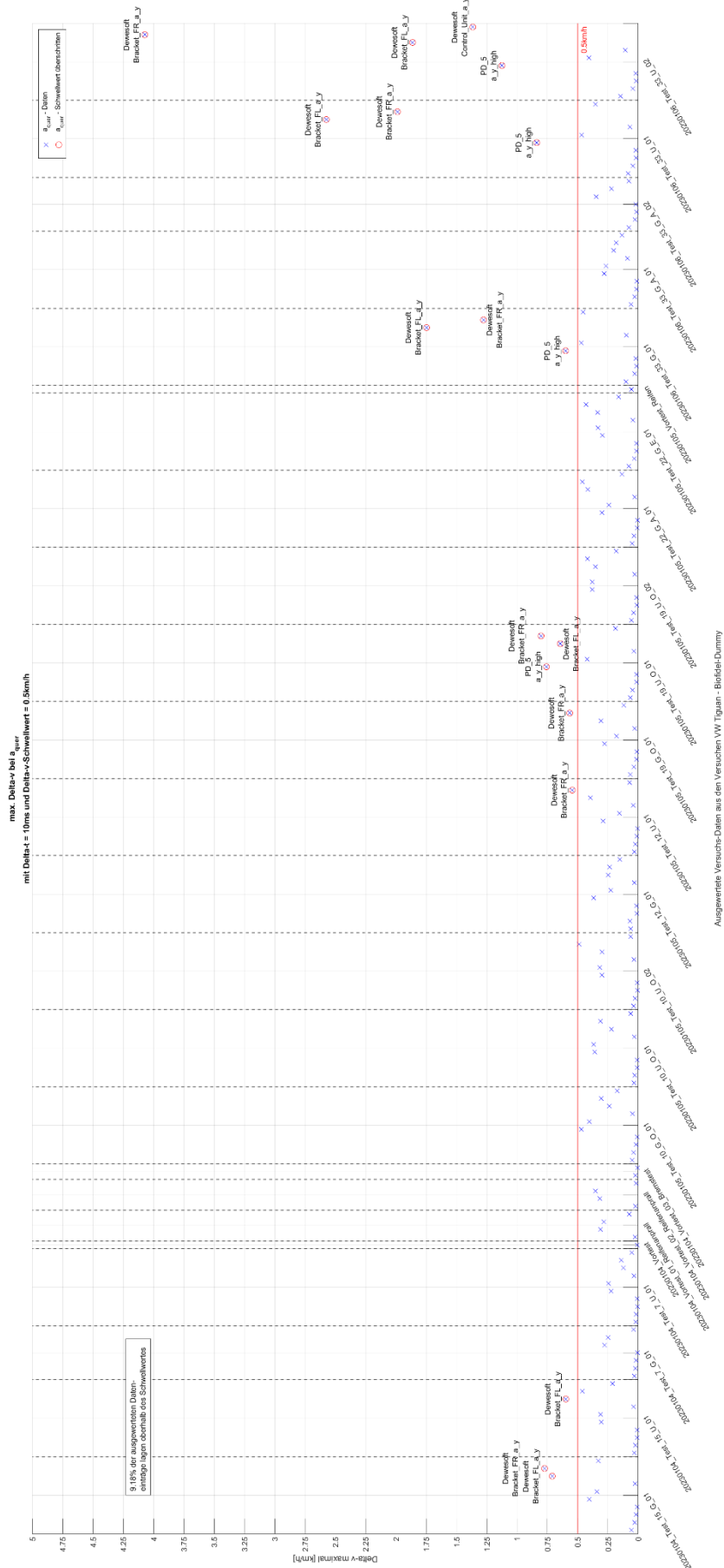
Anlage 94: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von $0,5\text{ km/h}$ innerhalb von 10 ms
(Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 2 - mit Up- und Downsampling)

Anlagen



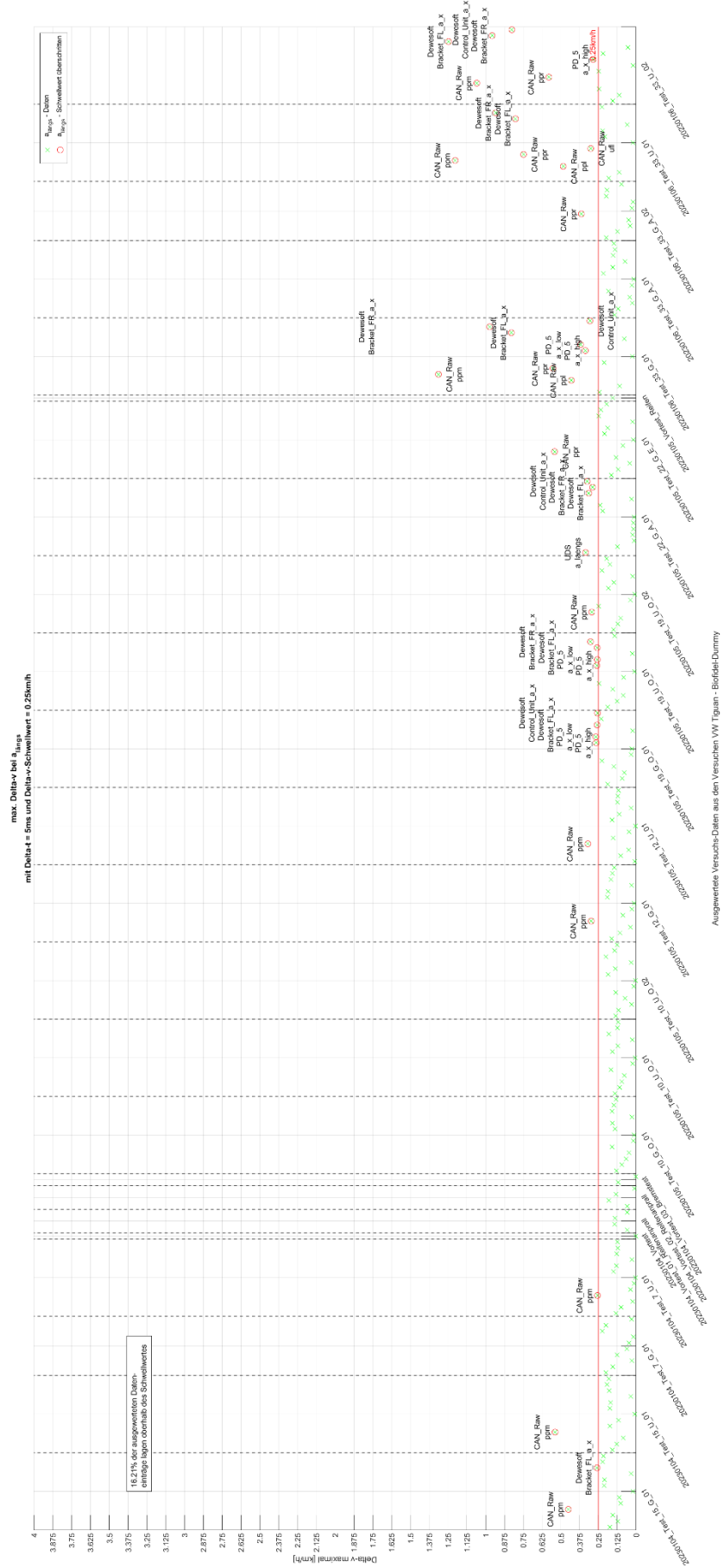
**Anlage 95: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms
(Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 3 - mit Up- und Downsampling)**

Anlagen



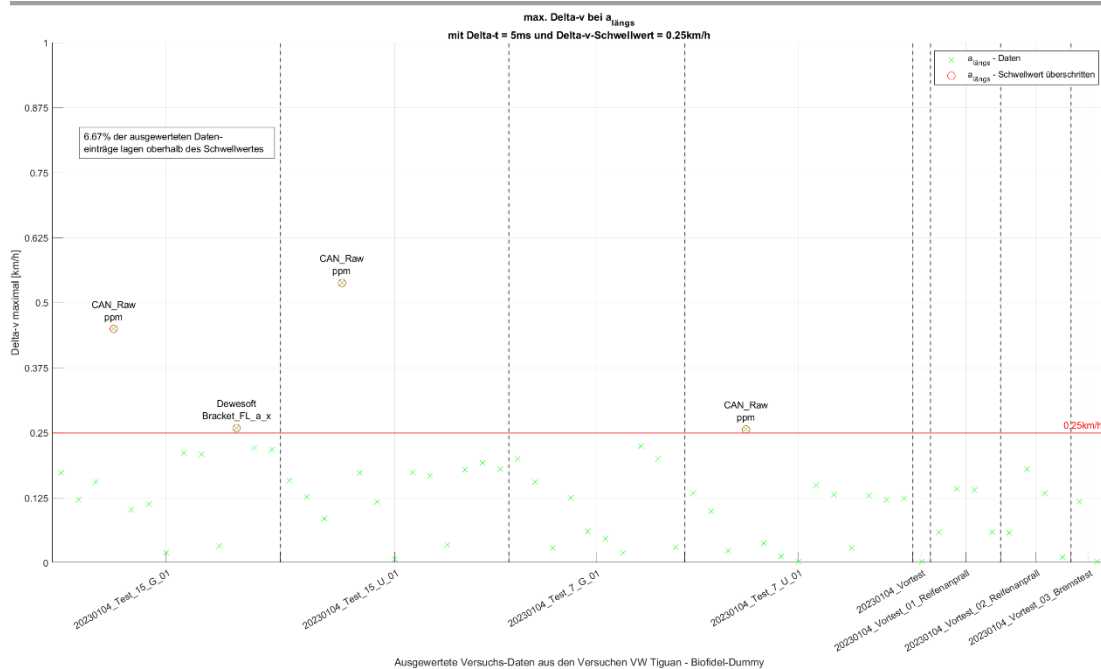
Anlage 96: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - ohne Up- und Downsampling)

Anlagen



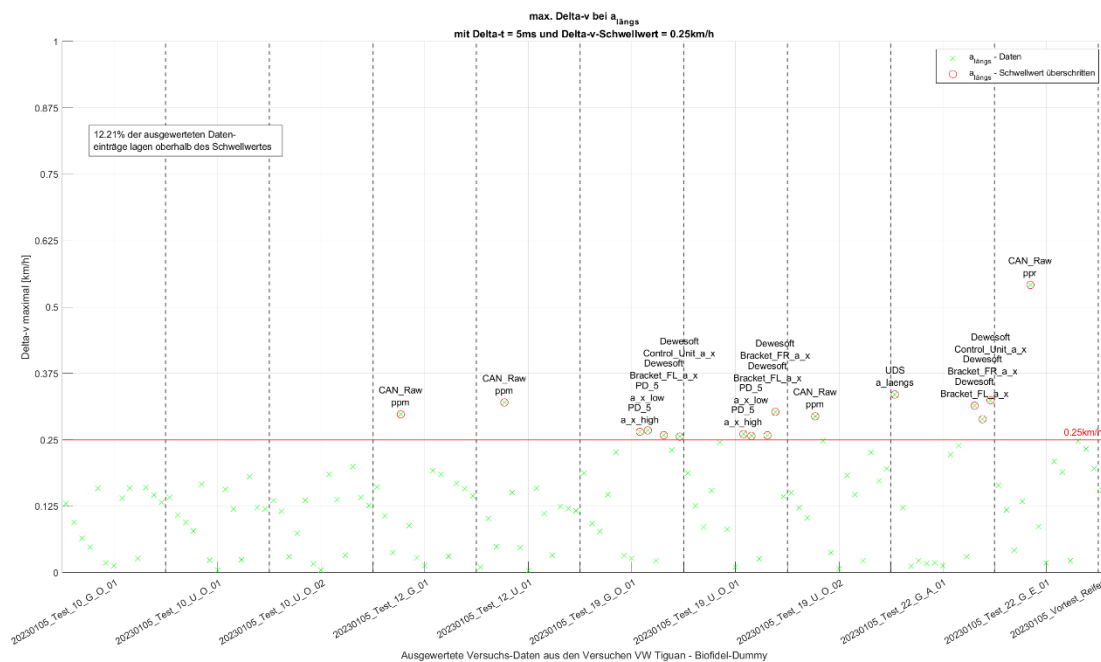
Anlage 97: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - mit Up- und Downsampling)

Anlagen



Ausgewertete Versuchs-Daten aus den Versuchen VW Tiguan - Biofidel-Dummy

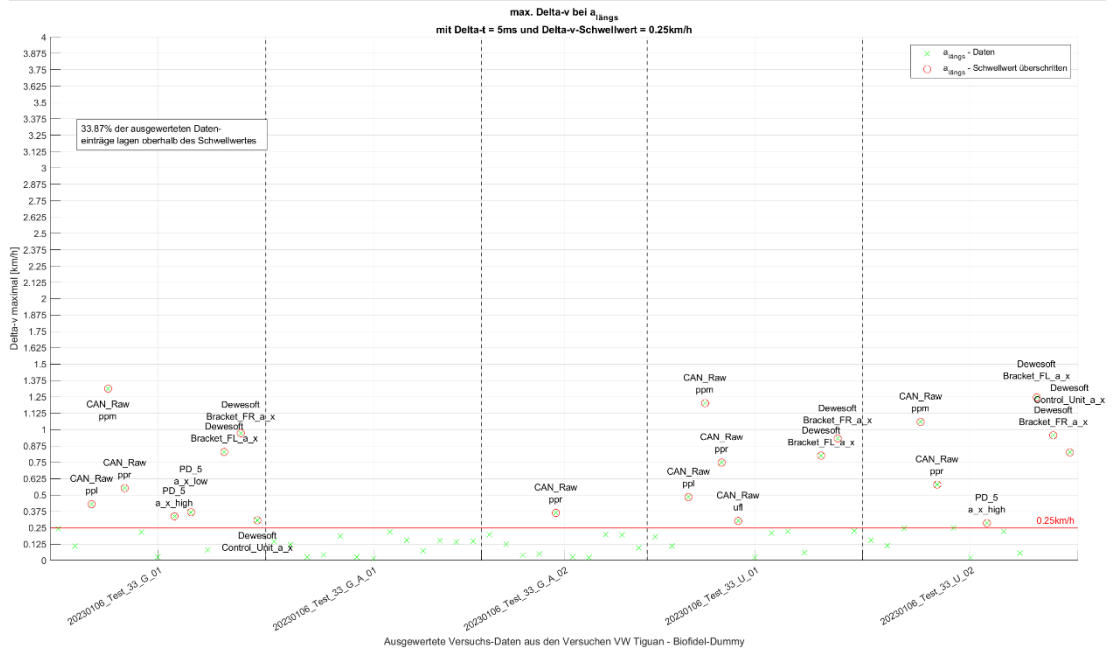
Anlage 98: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 1 - mit Up- und Downsampling)



Ausgewertete Versuchs-Daten aus den Versuchen VW Tiguan - Biofidel-Dummy

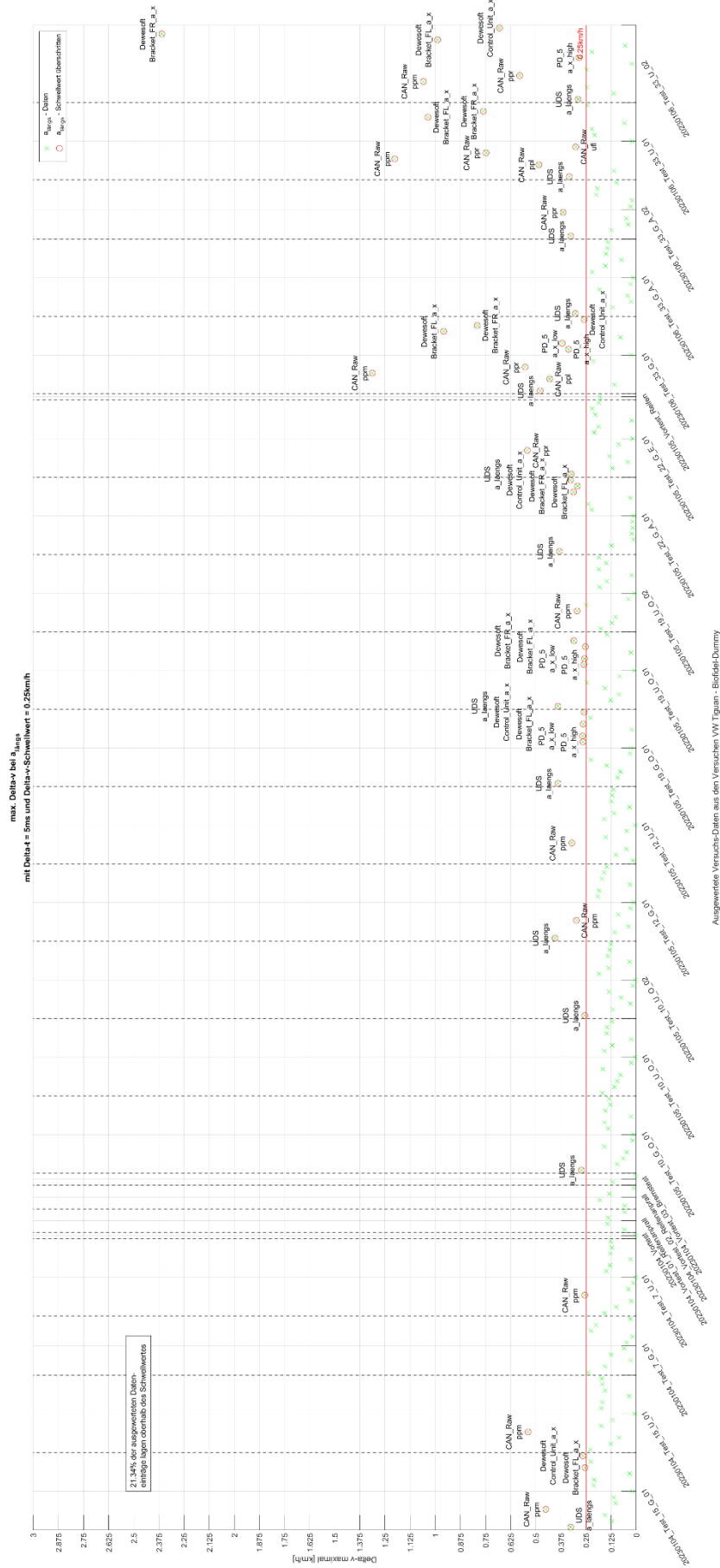
Anlage 99: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 2 - mit Up- und Downsampling)

Anlagen



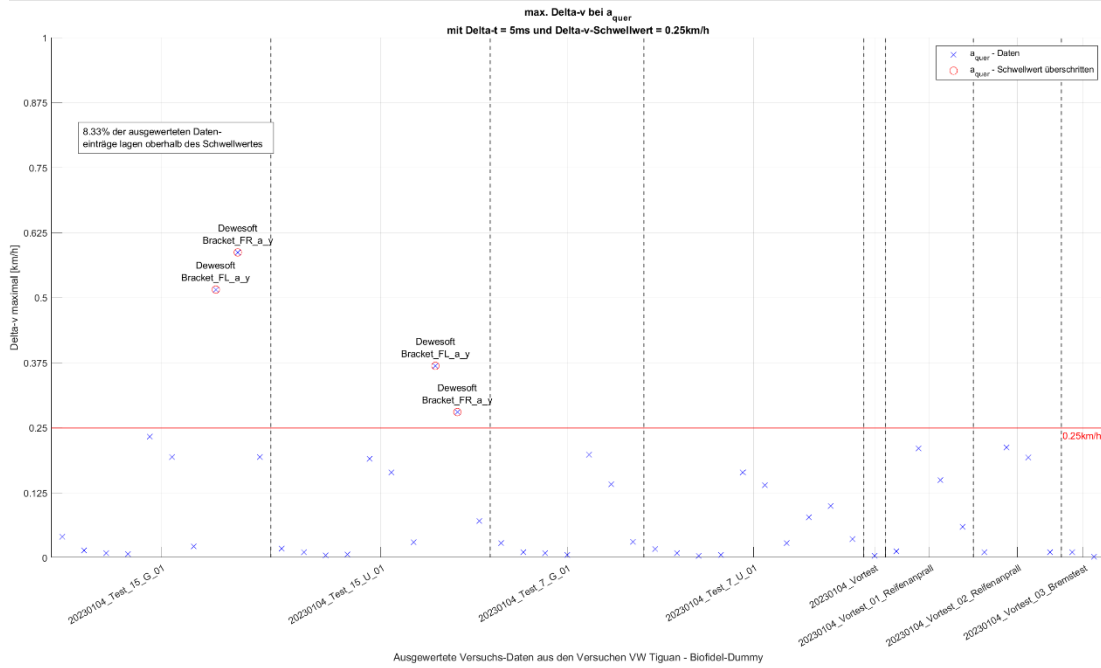
Anlage 100: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von $0,25\text{ km/h}$ innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 3 - mit Up- und Downsampling)

Anlagen

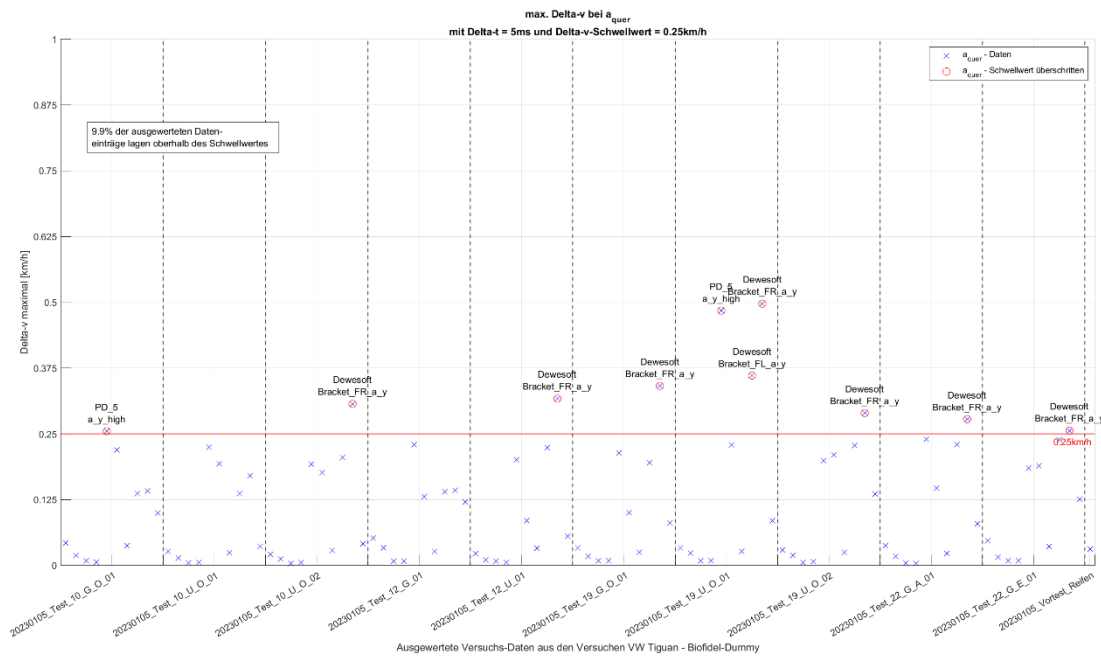


Anlage 101: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - ohne Up- und Downsampling)

Anlagen

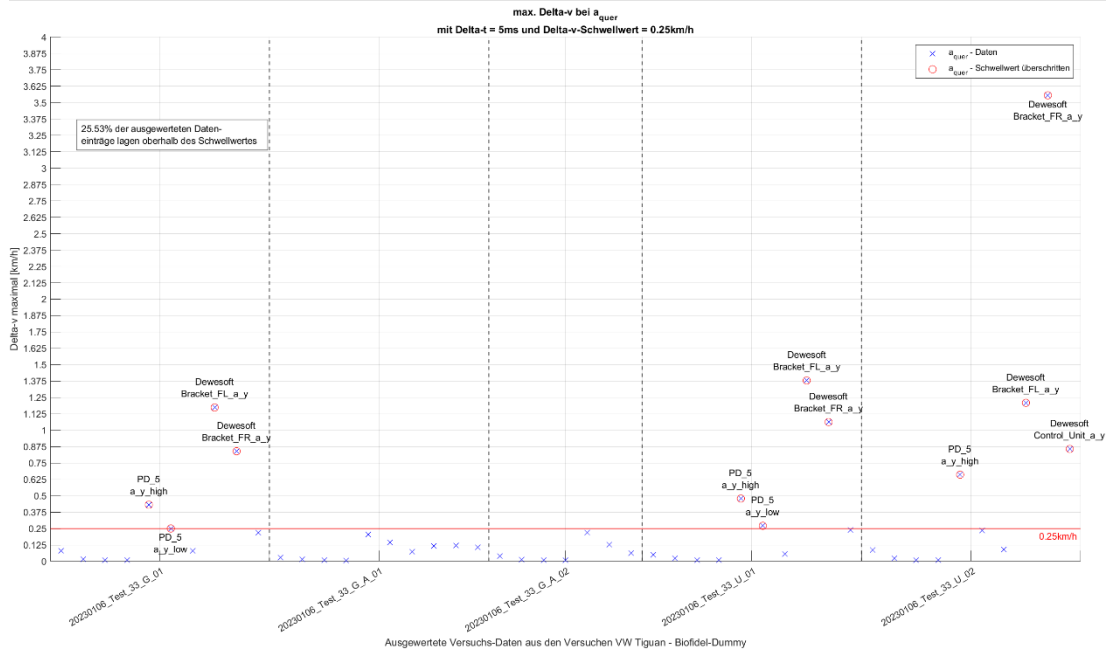


Anlage 103: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 1 - mit Up- und Downsampling)



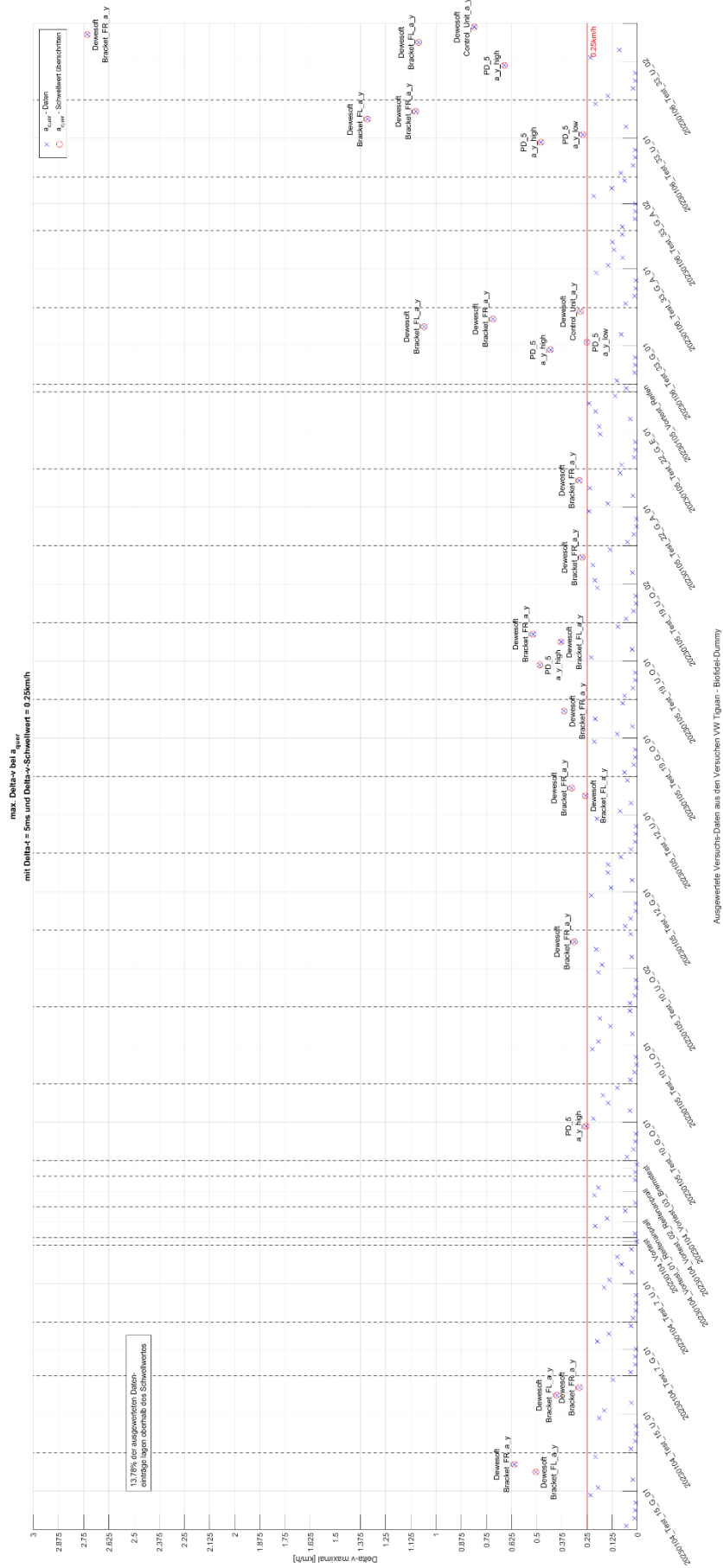
Anlage 104: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 2 - mit Up- und Downsampling)

Anlagen

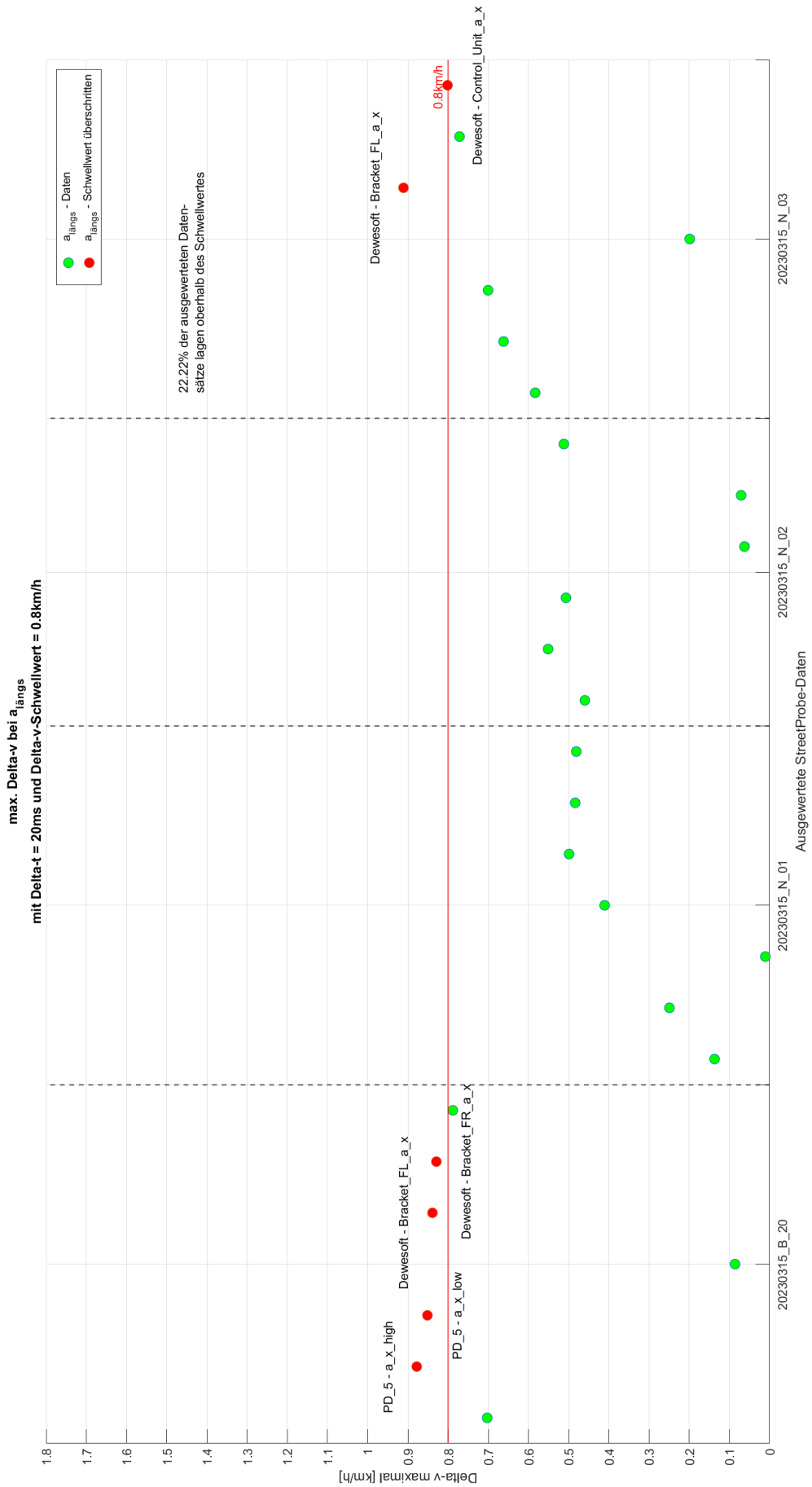


Anlage 105: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - Tag 3 - mit Up- und Downsampling)

Anlagen

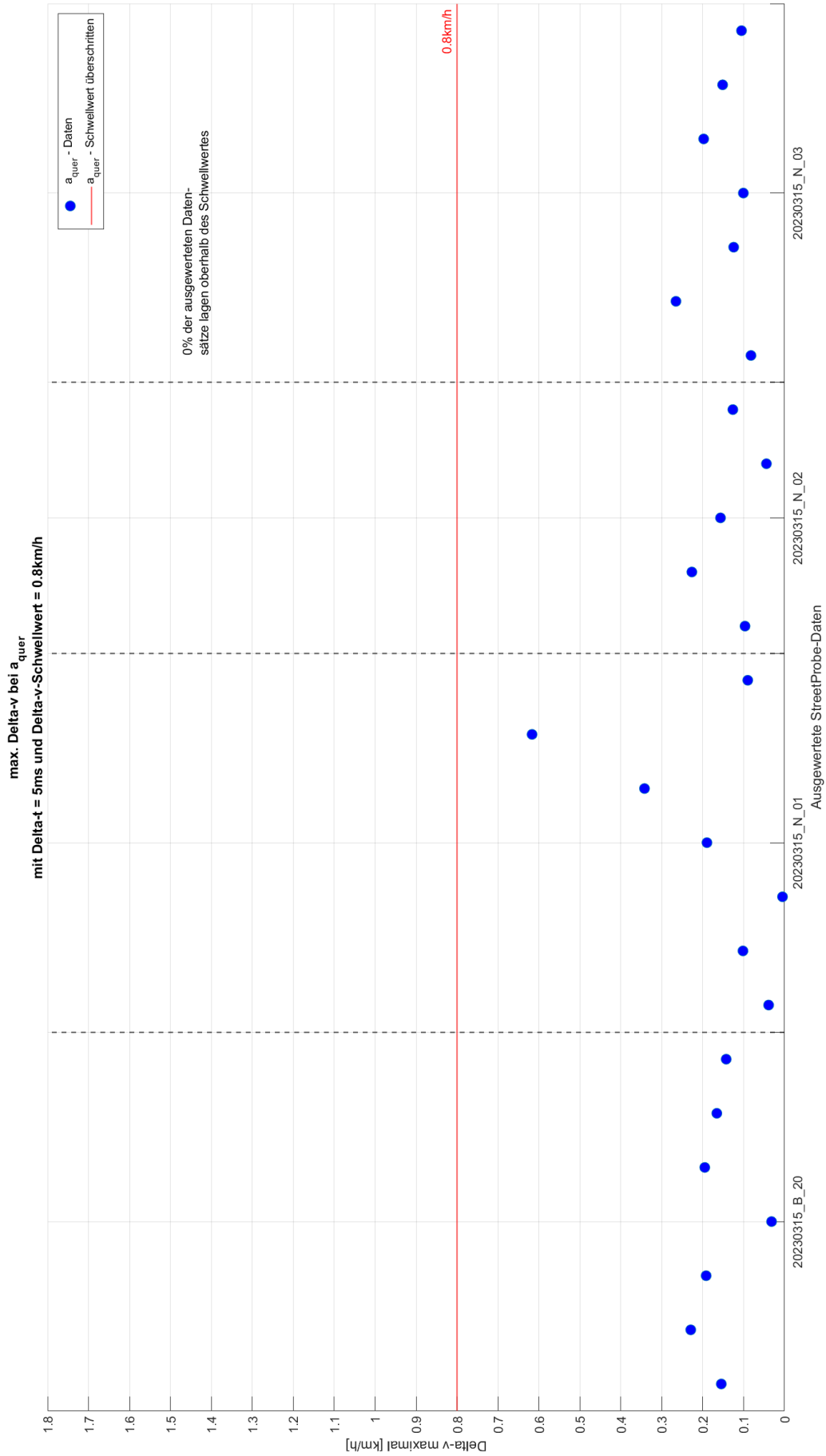


Anlage 106: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (Versuche mit dem Biofidel-Dummy - ohne Up- und Downsampling)

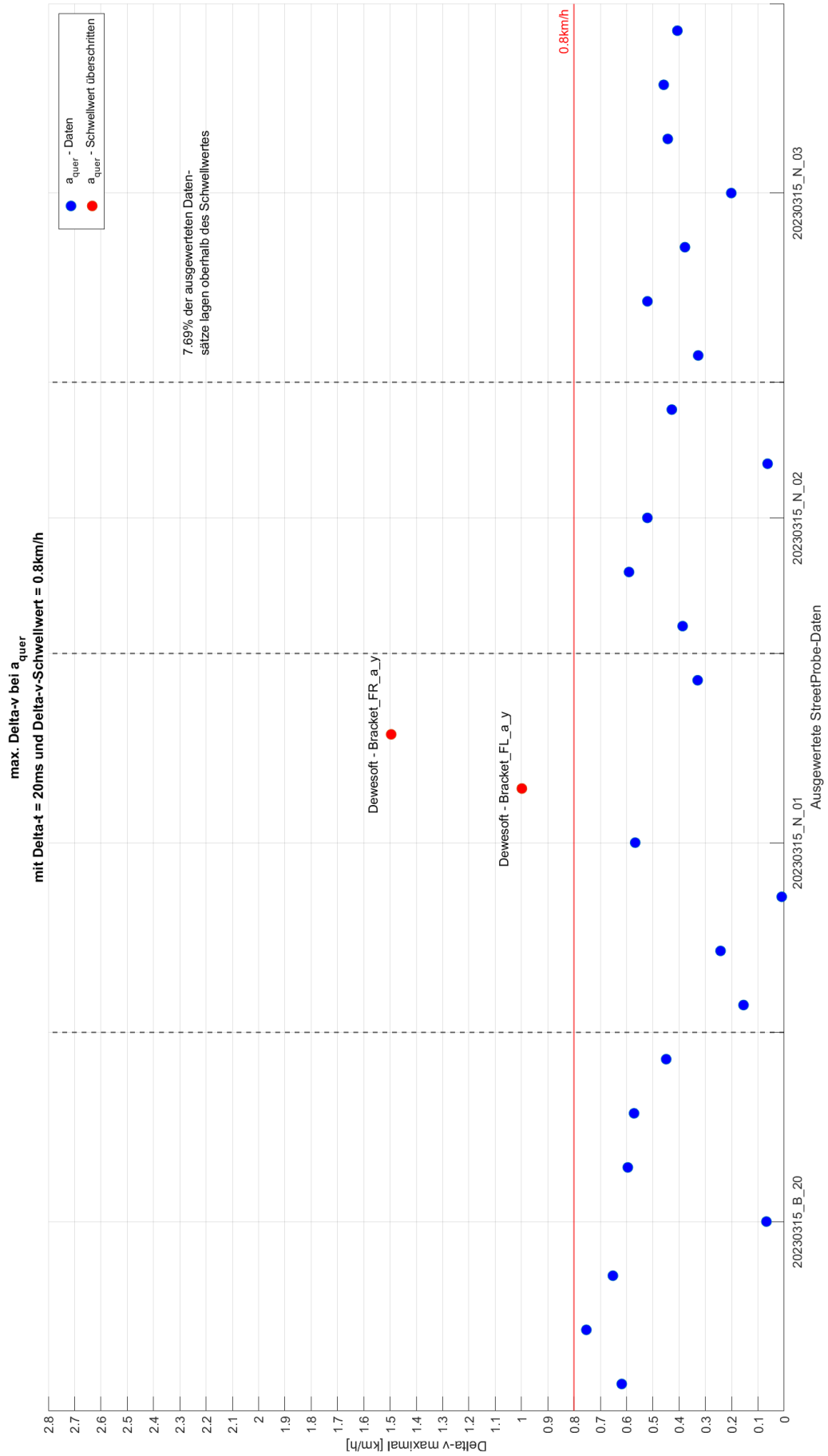


Anlage 107: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von $0,8\text{ km/h}$ innerhalb von 20 ms (StreetProbe-Versuche - mit Up- und Downsampling)

Anlagen

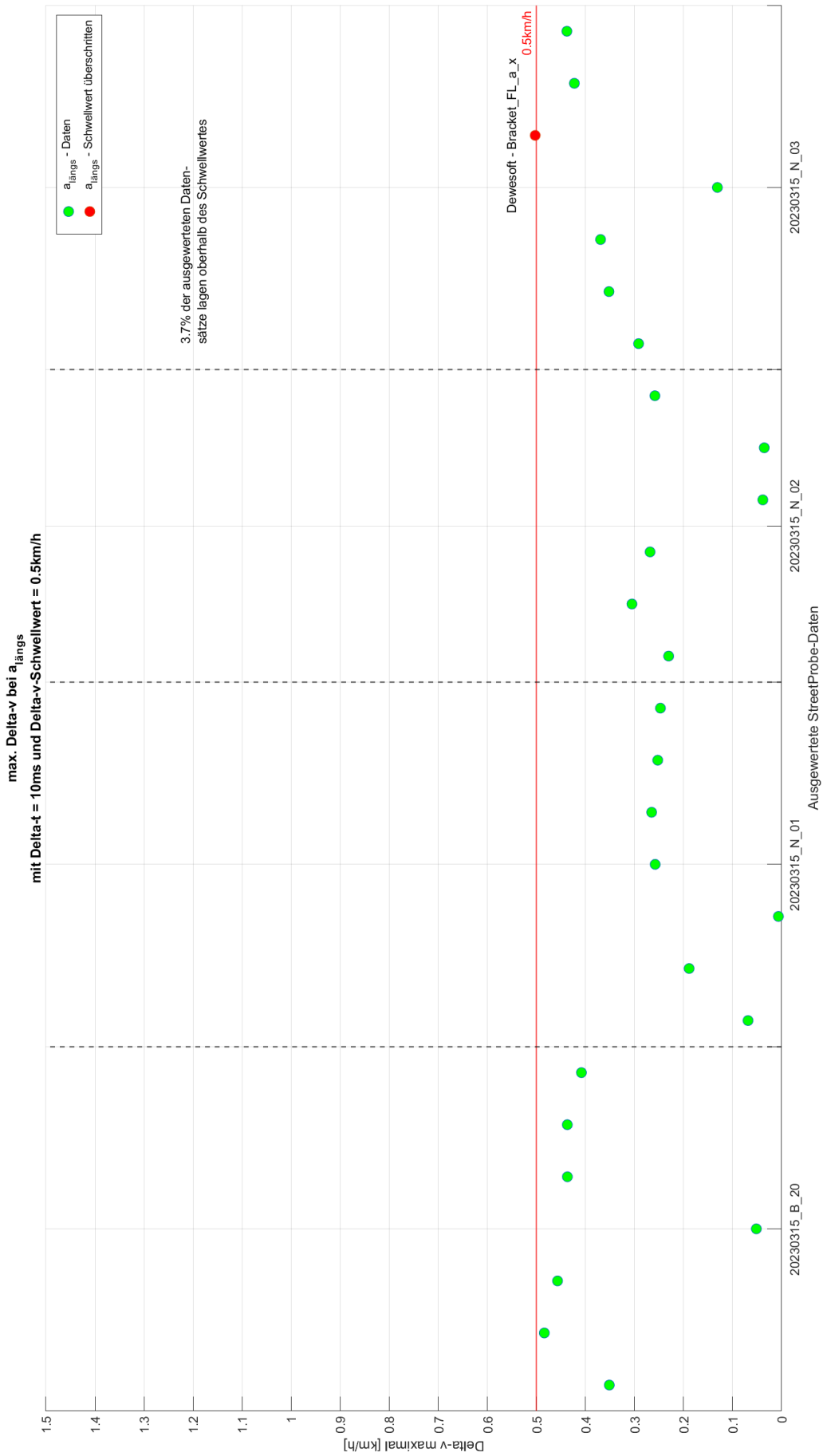


Anlage 108: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 5 ms (StreetProbe-Versuche - mit Up- und Downsampling)



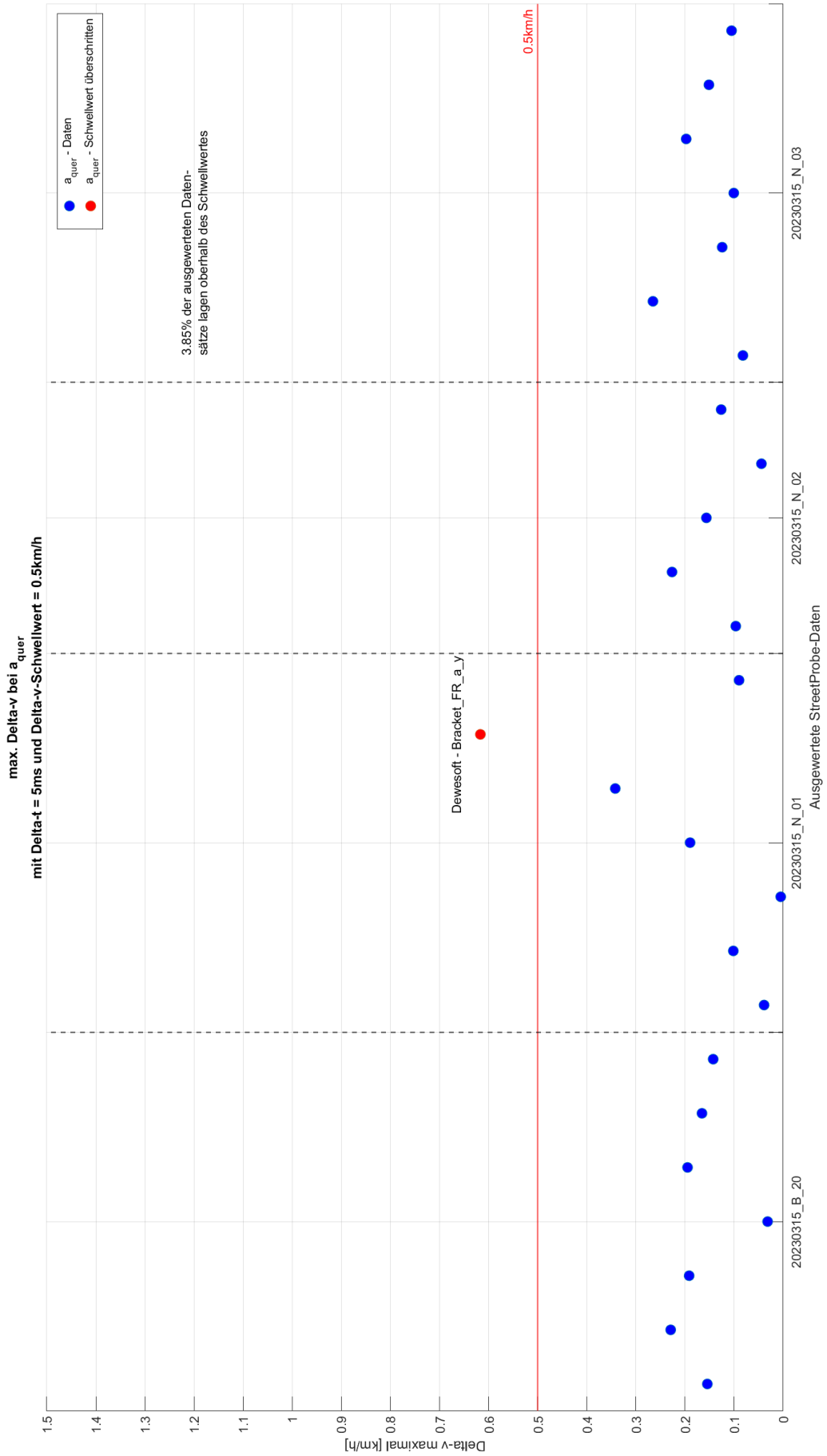
Anlage 109: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms (StreetProbe-Versuche - mit Up- und Downsampling)

Anlagen



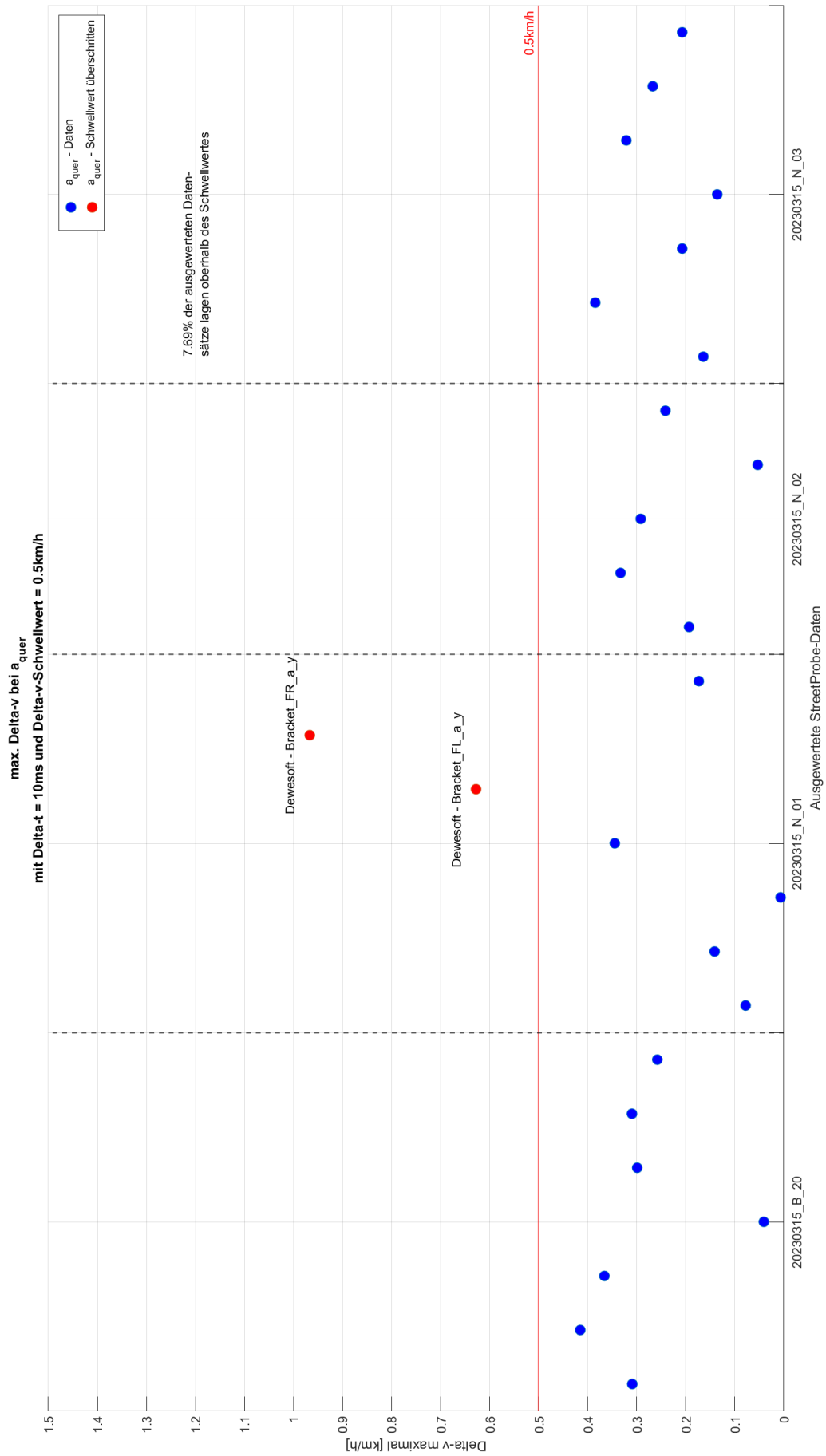
Anlage 110: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (StreetProbe-Versuche - mit Up- und Downsampling)

Anlagen



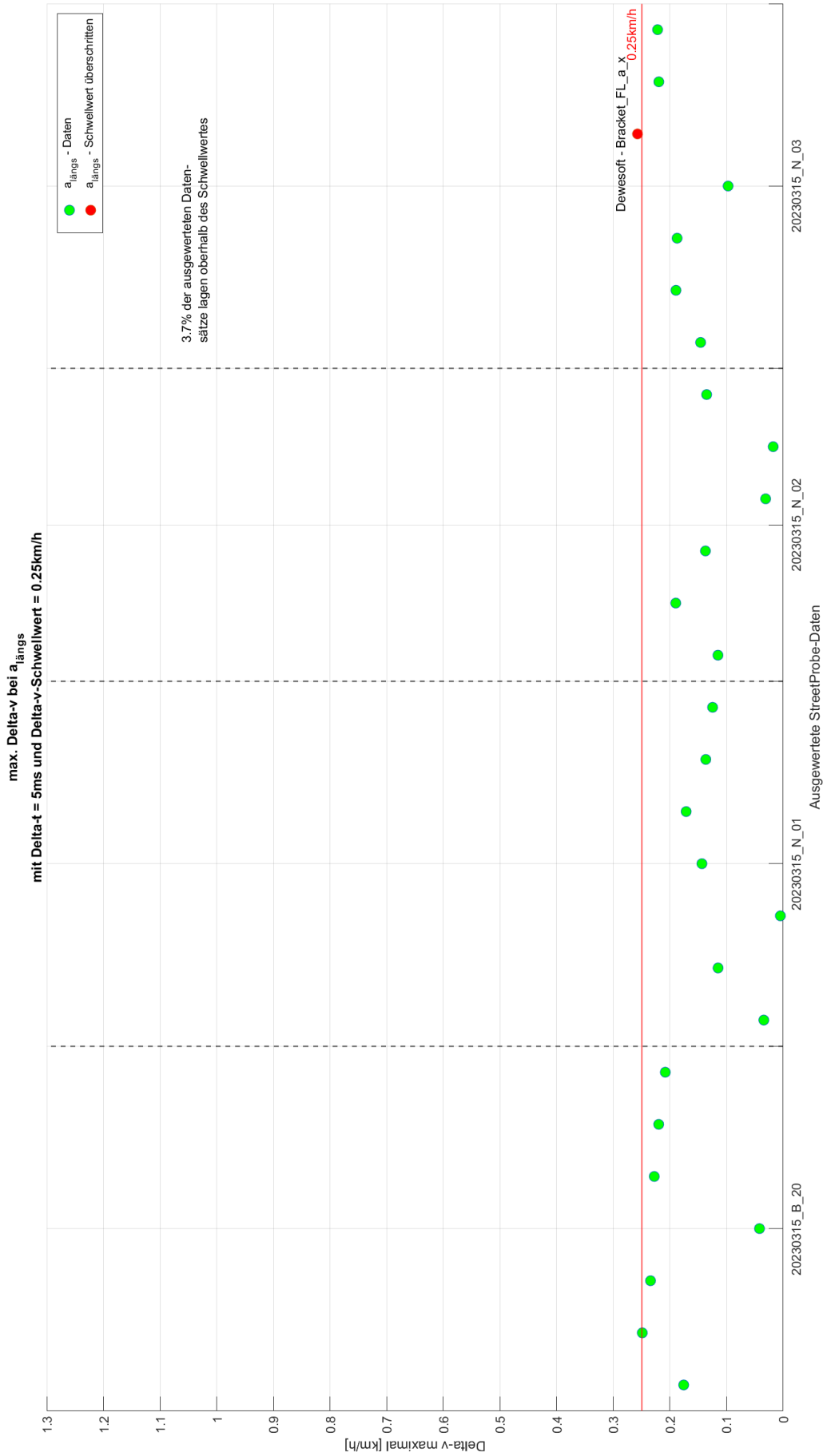
Anlage 111: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 5 ms (StreetProbe-Versuche - mit Up- und Downsampling)

Anlagen



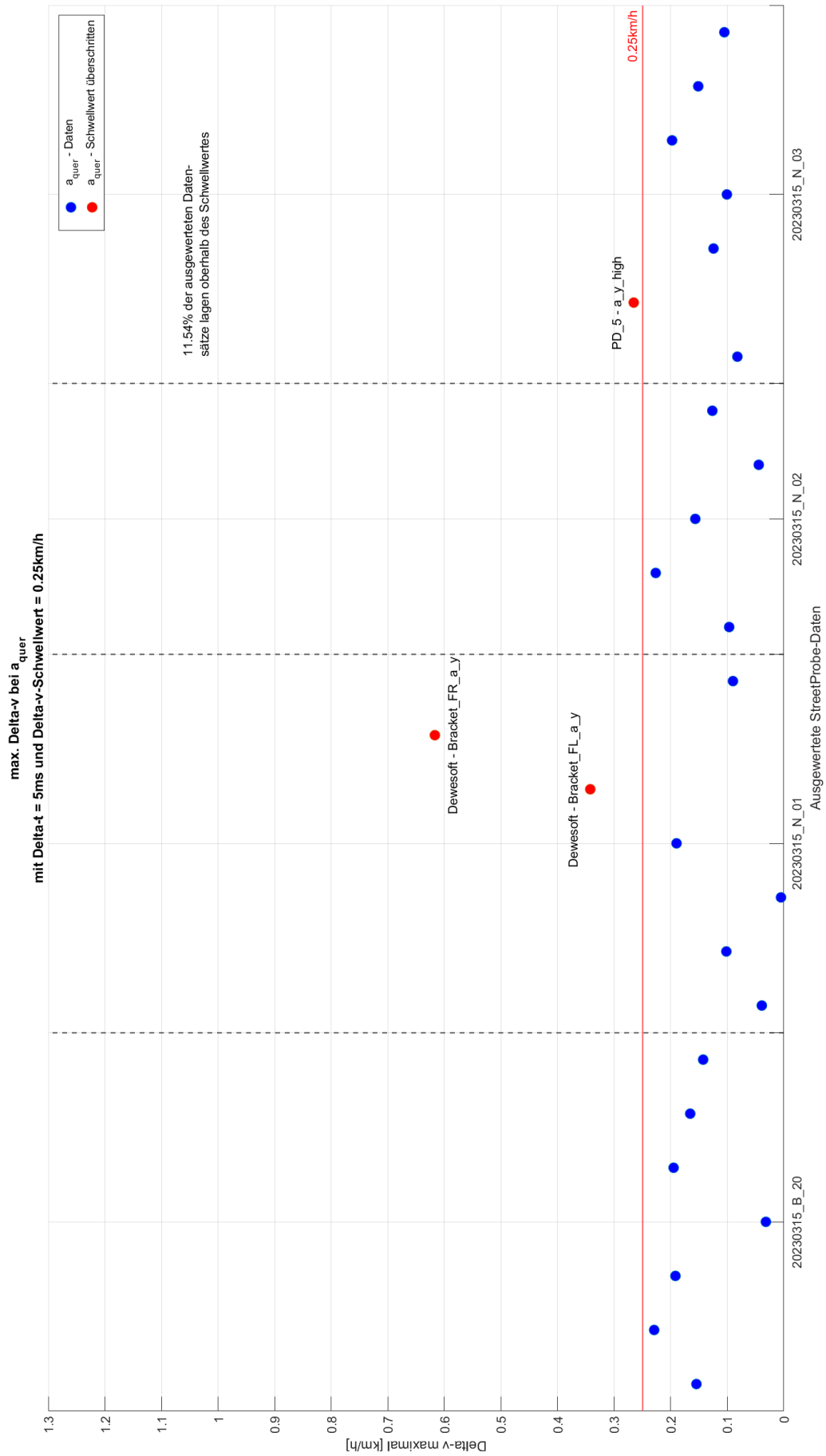
Anlage 112: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,5 km/h innerhalb von 10 ms (StreetProbe-Versuche - mit Up- und Downsampling)

Anlagen



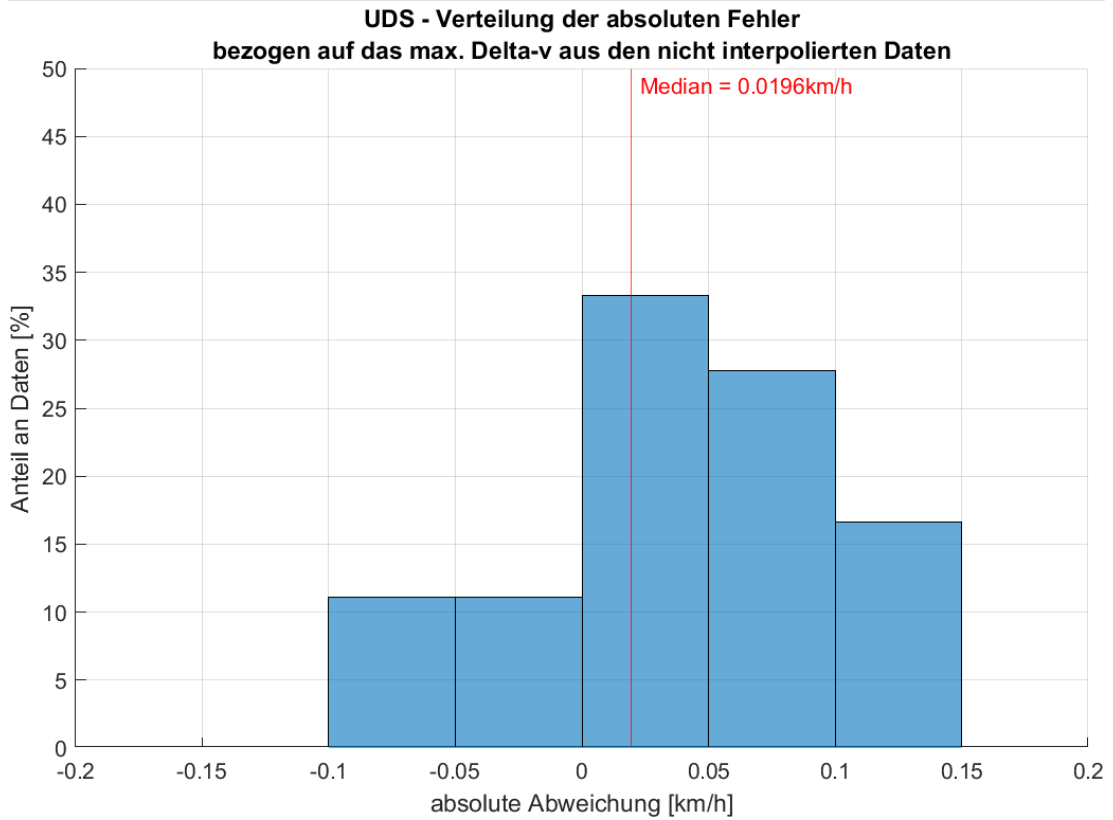
Anlage 113: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Längsrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (StreetProbe-Versuche - mit Up- und Downsampling)

Anlagen

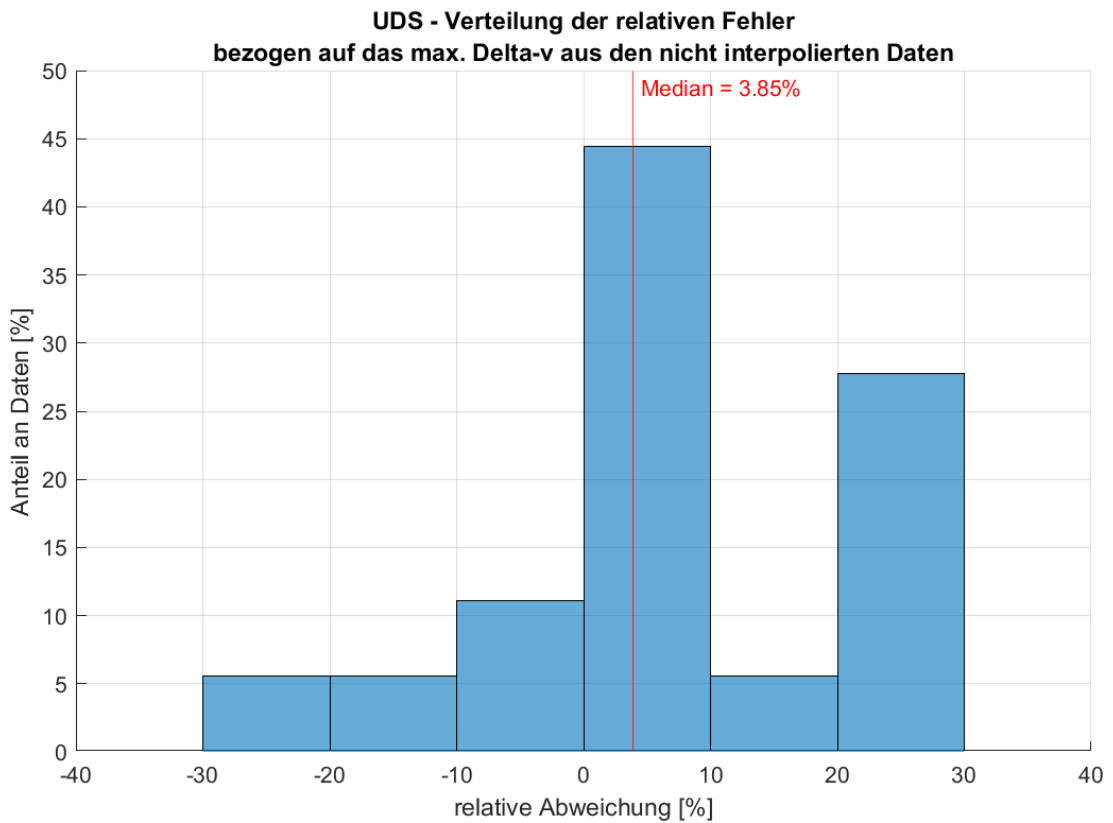


Anlage 114: Auswertung der Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung mit einem Schwellwert von 0,25 km/h innerhalb von 5 ms (StreetProbe-Versuche - mit Up- und Downsampling)

Anlagen

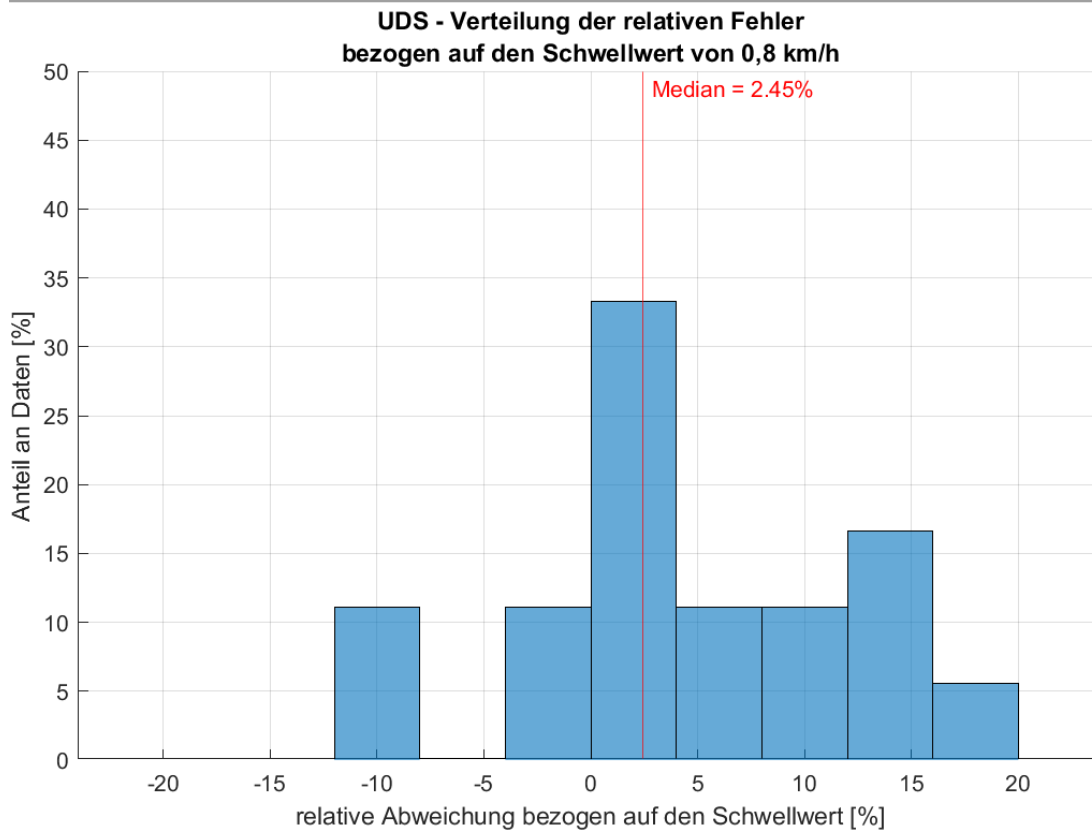


Anlage 115: Verteilung der absoluten Abweichung nach der Interpolation der UDS-Daten in Längsrichtung bezogen auf das Maximum der nicht interpolierten Daten bei den Versuchen mit dem Biofidel-Dummy



Anlage 116: Verteilung der relativen Abweichung nach der Interpolation der UDS-Daten in Längsrichtung bezogen auf das Maximum der nicht interpolierten Daten bei den Versuchen mit dem Biofidel-Dummy

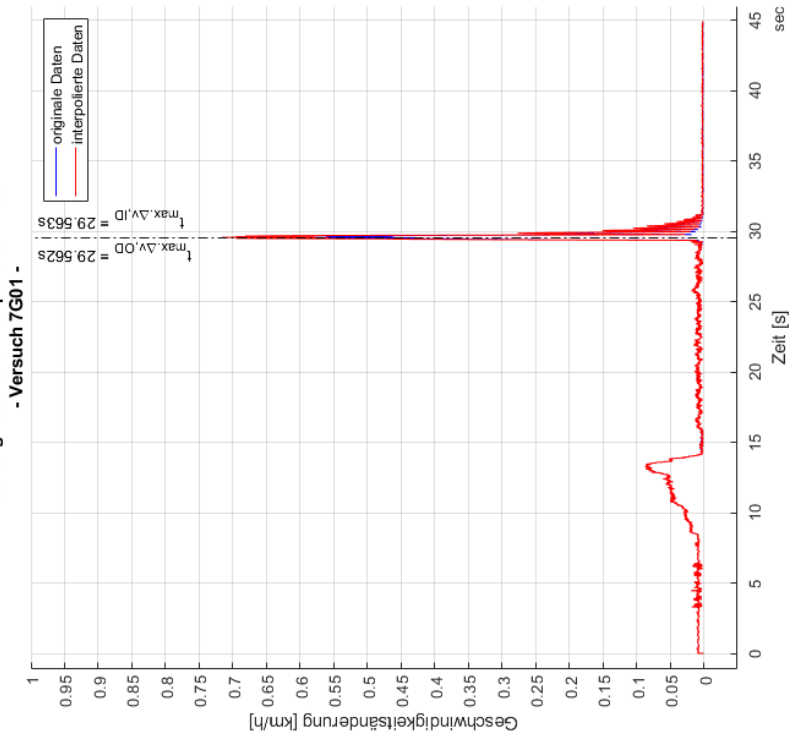
Anlagen



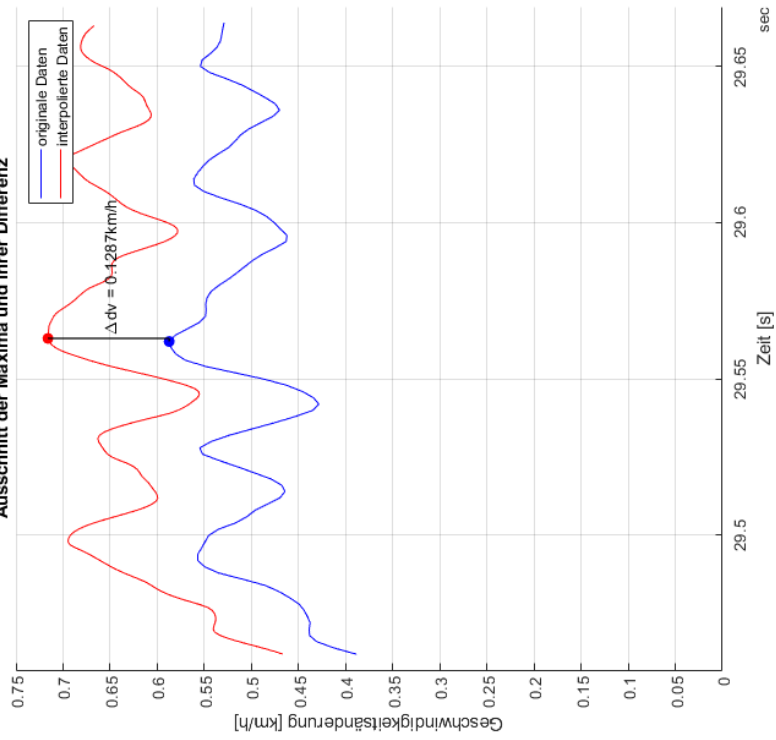
Anlage 117: Verteilung der relativen Abweichung nach der Interpolation der UDS-Daten in Längsrichtung bezogen auf den Schwellwert von 0,8 km/h bei den Versuchen mit dem Biofidel-Dummy

UDS-Daten - max. absolute Abweichung der berechneten Maxima

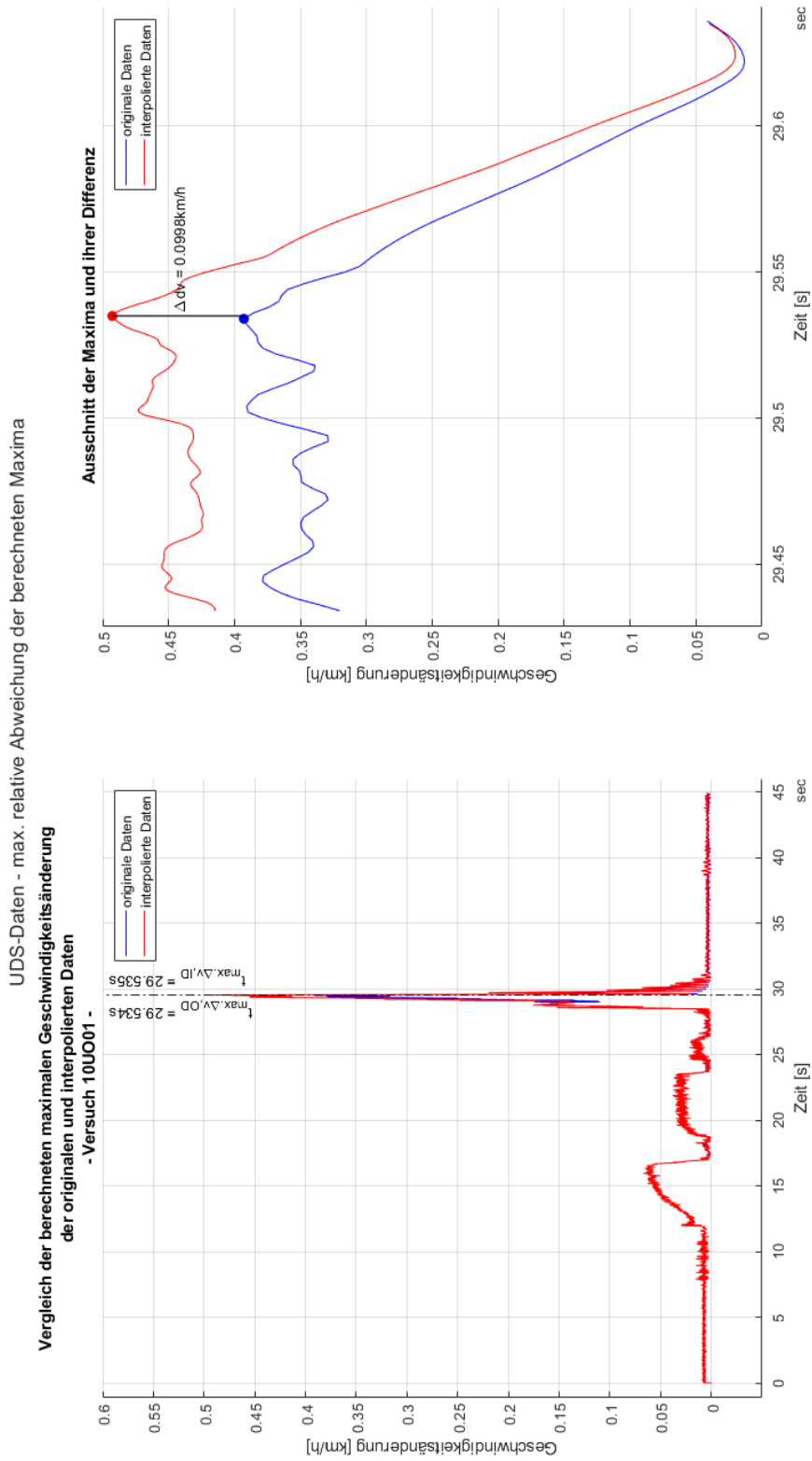
Vergleich der berechneten maximalen Geschwindigkeitsänderung der originalen und interpolierten Daten



Ausschnitt der Maxima und ihrer Differenz



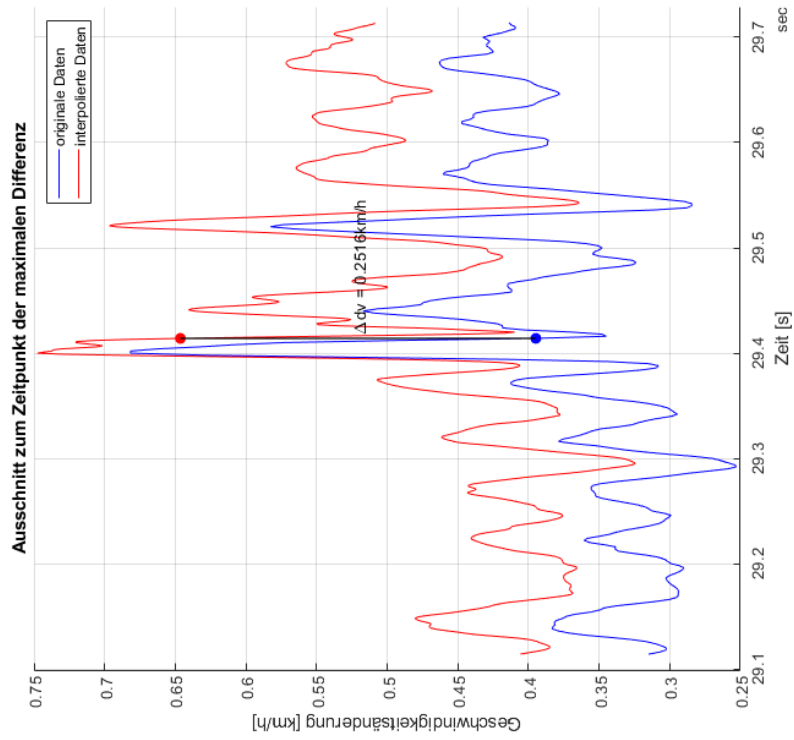
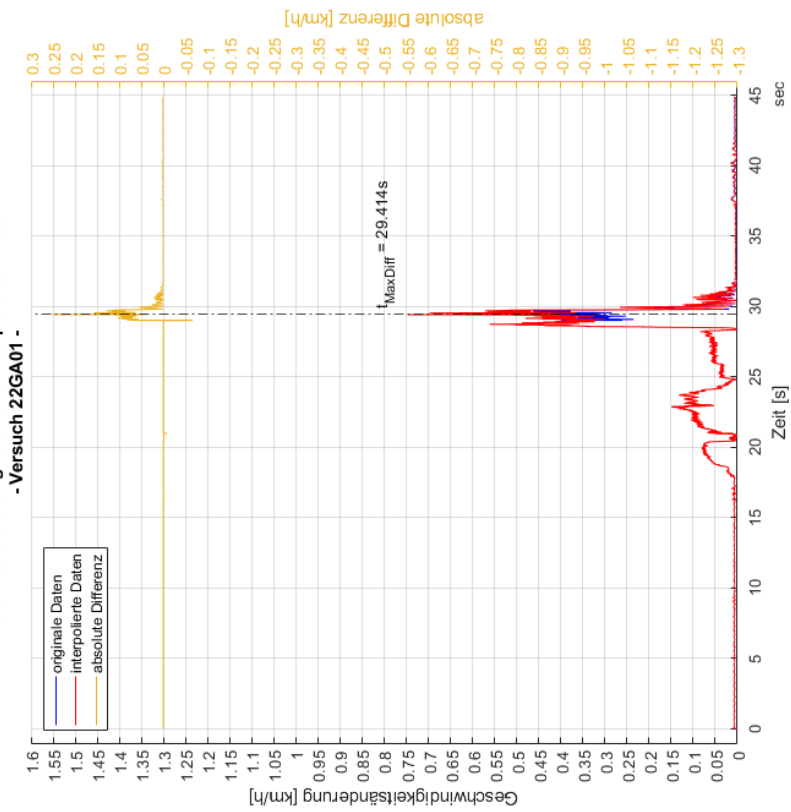
Anlage 118: Darstellung der maximalen absoluten Abweichung der Maxima der Geschwindigkeitsänderung basierend auf der Längsbeschleunigung des UDS - Versuch 7-G-01



Anlage 119: Darstellung der maximalen relativen Abweichung der Maxima der Geschwindigkeitsänderung basierend auf der Längsbeschleunigung des UDS - Versuch 10-UO-01

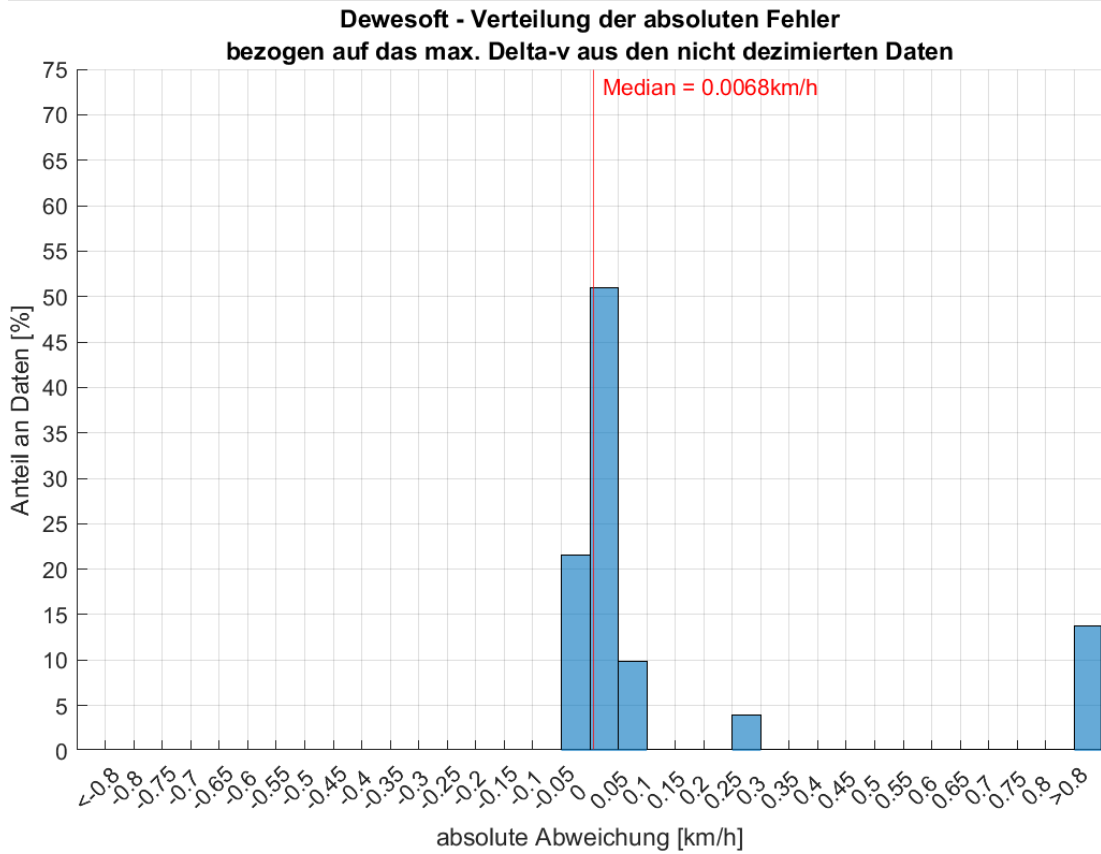
UDS-Daten - max. relative und absolute Abweichung der Zeitreihe

Vergleich der berechneten Geschwindigkeitsänderung auf Basis der originalen und interpolierten Daten

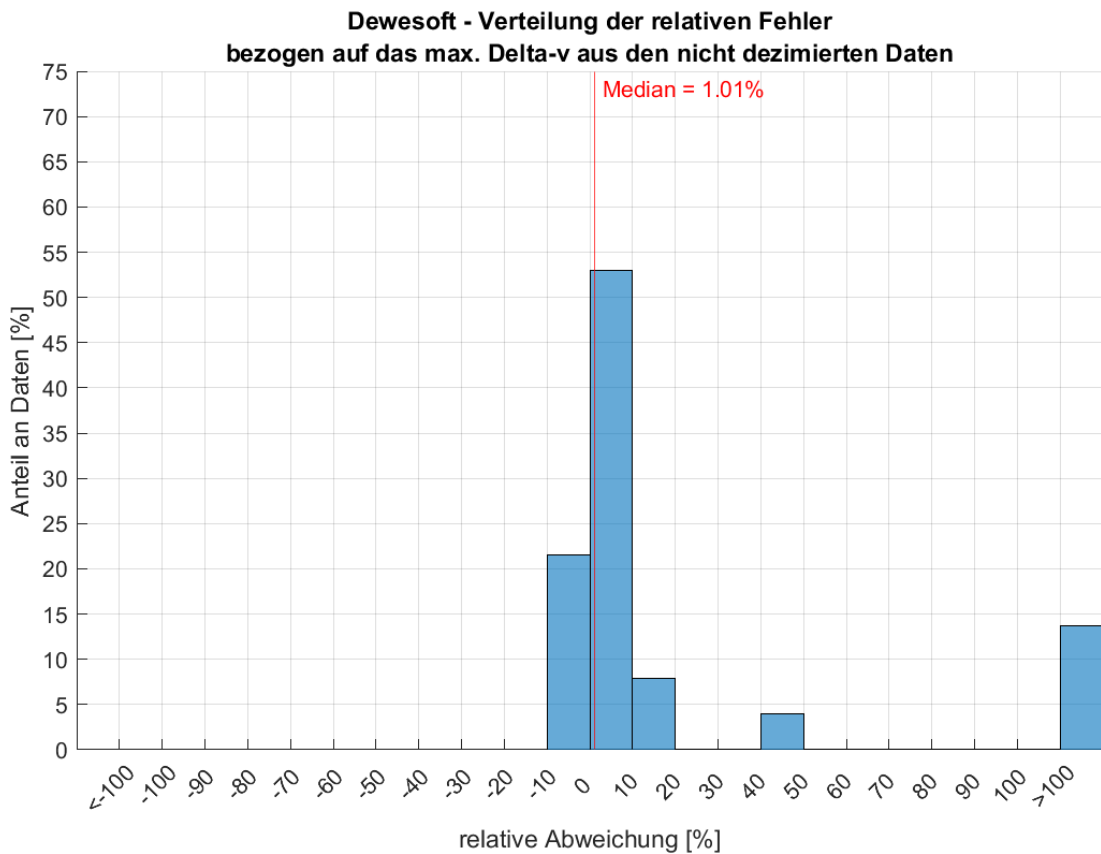


Anlage 120: Darstellung der maximalen absoluten und relativen Abweichung der Zeitreihe der Geschwindigkeitsänderung basierend auf der Längsbeschleunigung des UDS - Versuch 22-GA-01

Anlagen

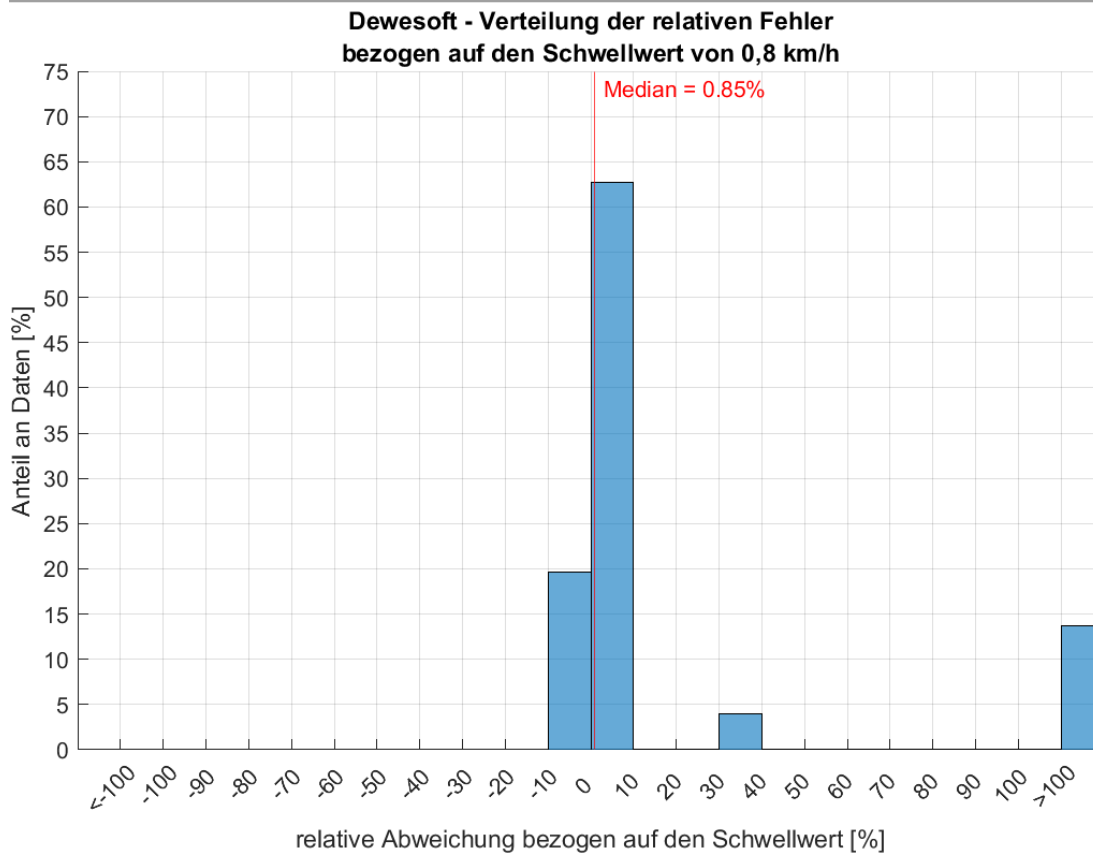


Anlage 121: Verteilung der absoluten Abweichung nach der Dezimation der Dewesoft-Daten in Längsrichtung bezogen auf das Maximum der nicht dezimierten Daten bei den Versuchen mit dem Biofidel-Dummy



Anlage 122: Verteilung der relativen Abweichung nach der Dezimation der Dewesoft-Daten in Längsrichtung bezogen auf das Maximum der nicht dezimierten Daten bei den Versuchen mit dem Biofidel-Dummy

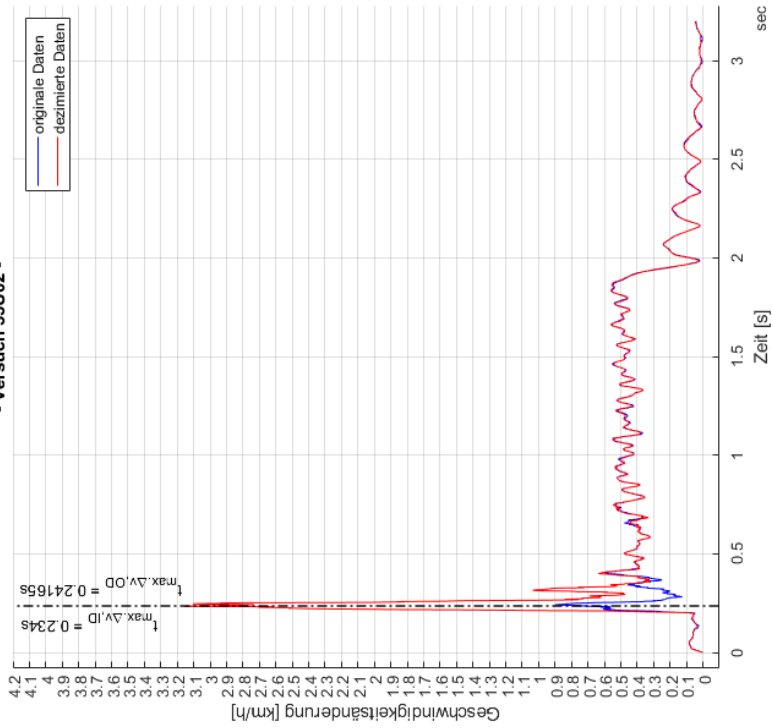
Anlagen



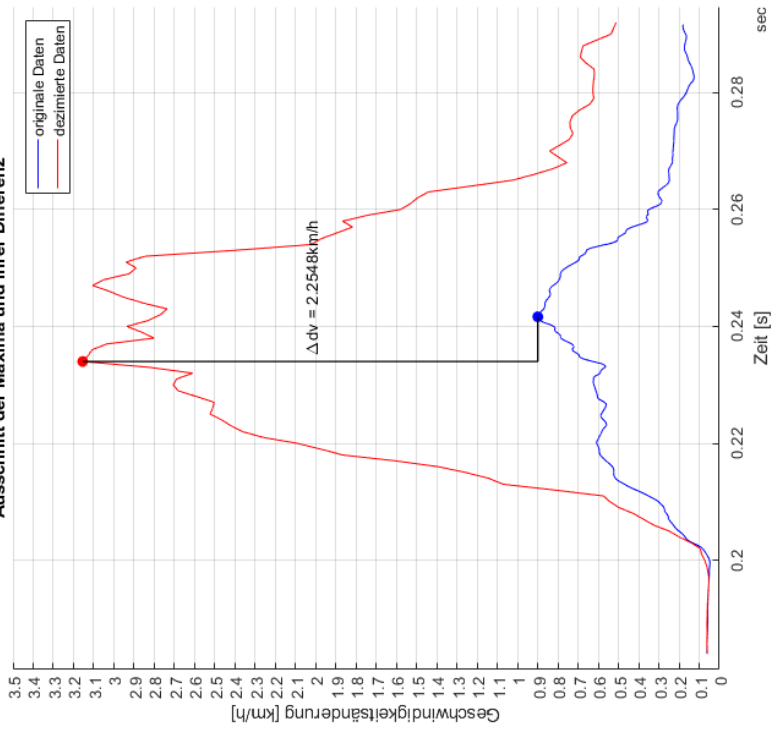
Anlage 123: Verteilung der relativen Abweichung nach der Dezimation der Dewesoft-Daten in Längsrichtung bezogen auf den Schwellwert von 0,8 km/h bei den Versuchen mit dem Biofidel-Dummy

Dewesoft-Daten - max. absolute Abweichung der berechneten Maxima

Vergleich der berechneten maximalen Geschwindigkeitsänderung der originalen und dezimierten Daten
- Versuch 33U02 -

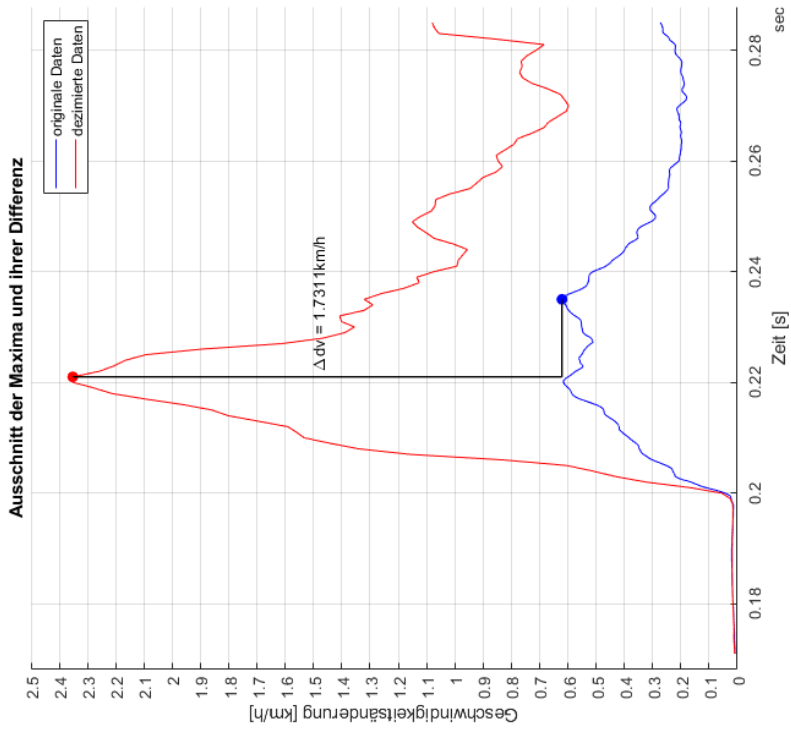


Ausschnitt der Maxima und ihrer Differenz

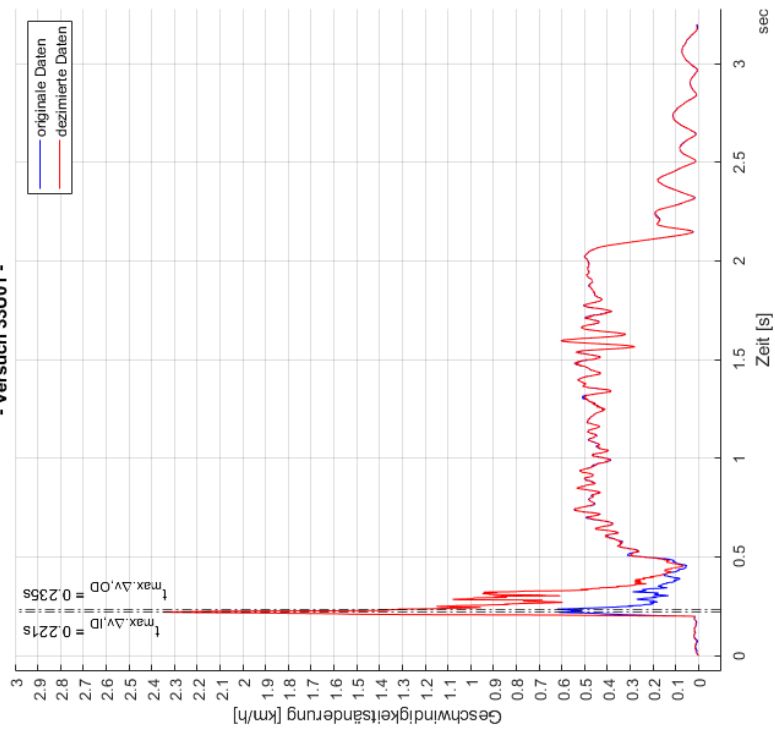


Anlage 124: Darstellung der maximalen absoluten Abweichung der Maxima der Geschwindigkeitsänderung basierend auf der Längsbeschleunigung des Dewesoft-Systems - Versuch 33-U-02

Dewesoft-Daten - max. relative Abweichung der berechneten Maxima



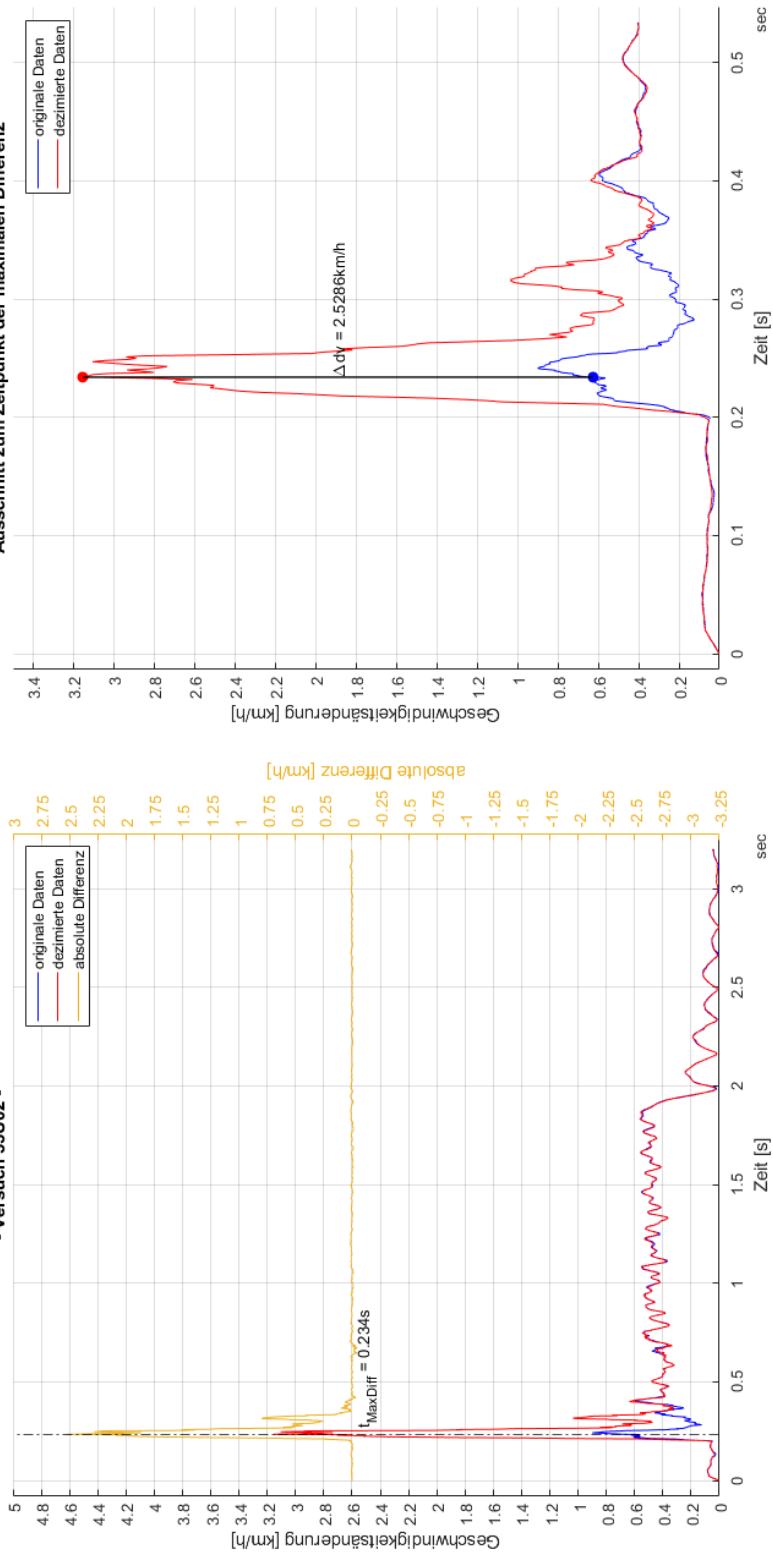
Vergleich der berechneten maximalen Geschwindigkeitsänderung der originalen und dezimierten Daten



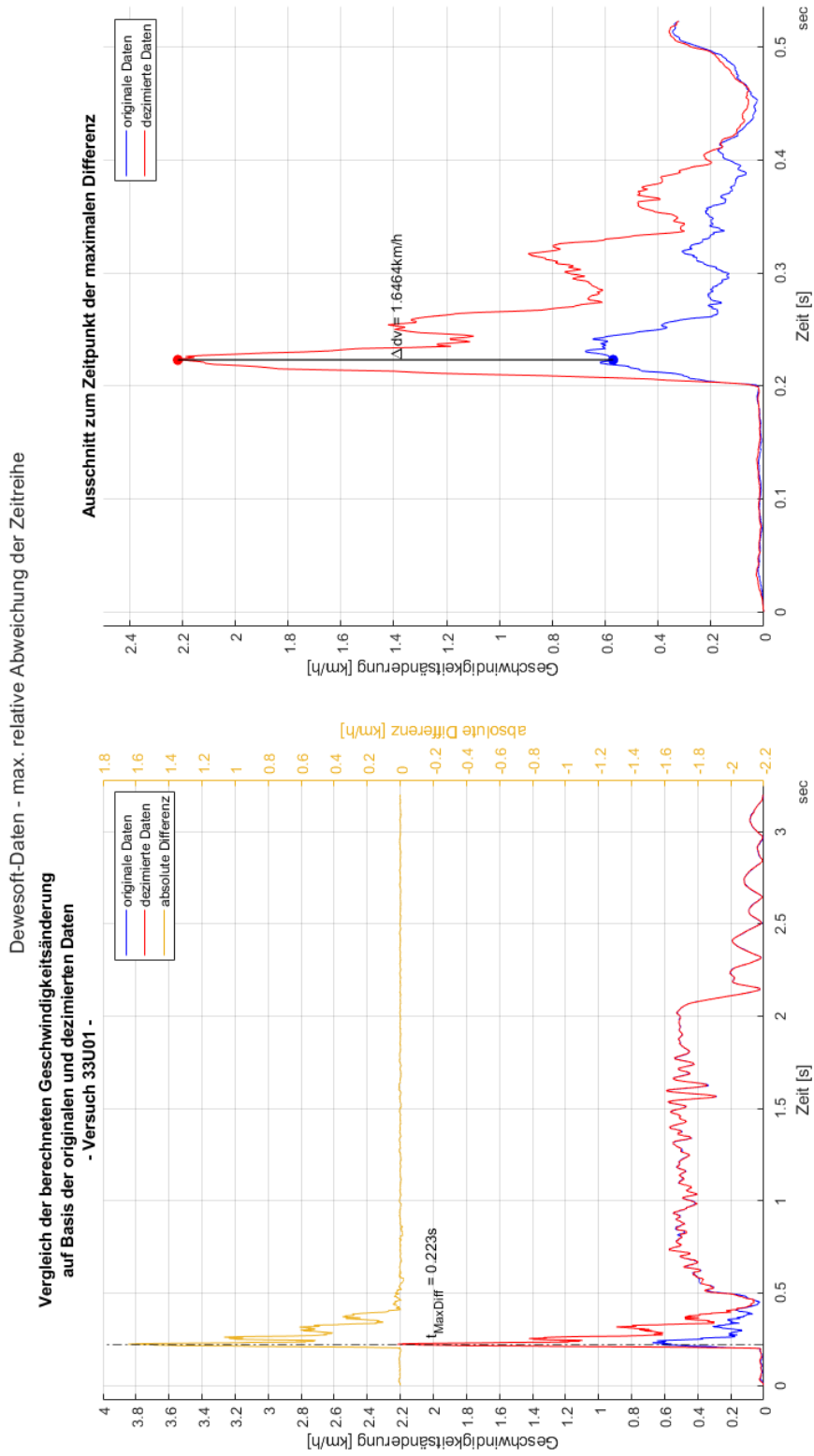
Anlage 125: Darstellung der maximalen relativen Abweichung der Maxima der Geschwindigkeitsänderung basierend auf der Längsbeschleunigung des Dewesoft-Systems - Versuch 33-U-01

Dewesoft-Daten - max. absolute Abweichung der Zeitreihe

Vergleich der berechneten Geschwindigkeitsänderung auf Basis der originalen und dezimierten Daten
- Versuch 33U02 -

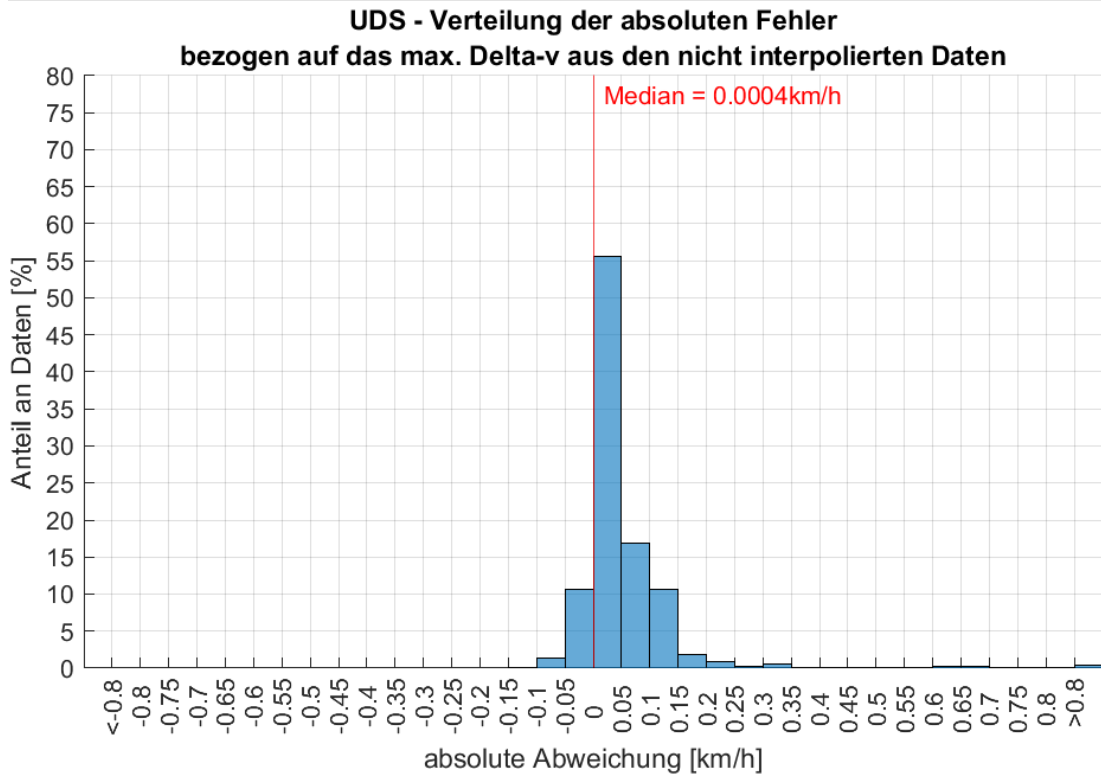


Anlage 126: Darstellung der maximalen absoluten Abweichung der Zeitreihe der Geschwindigkeitsänderung basierend auf der Längsbeschleunigung des Dewesoft-Systems - Versuch 33-U-02

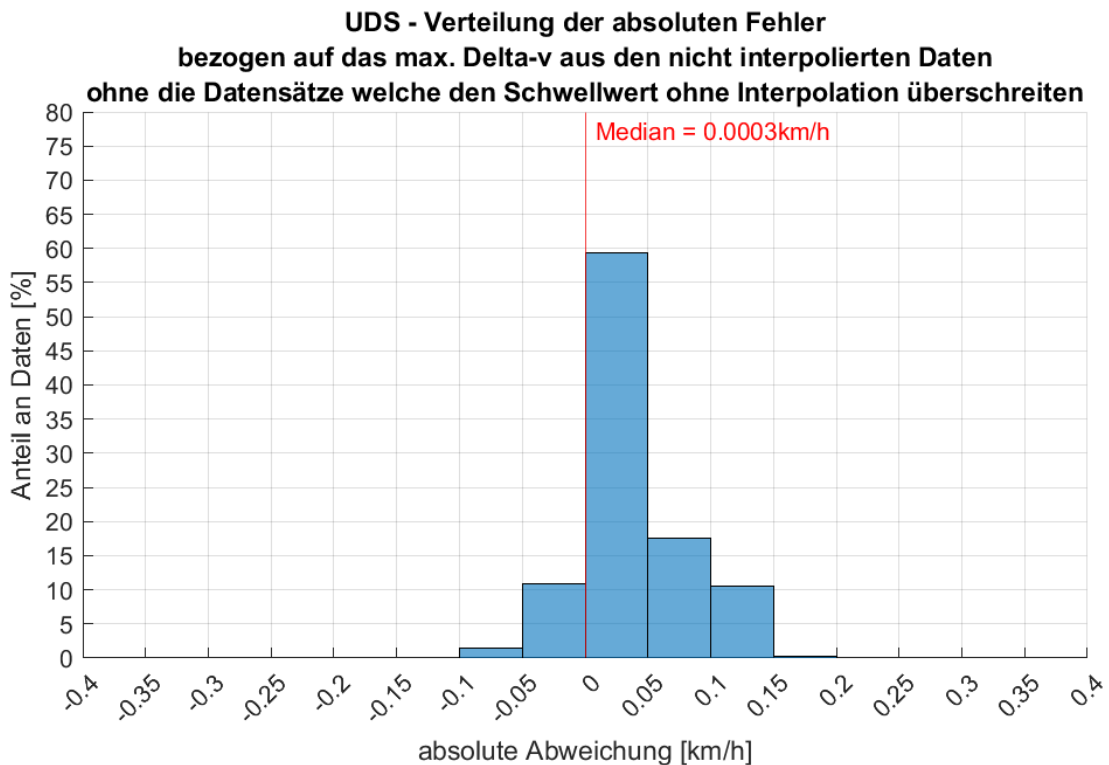


Anlage 127: Darstellung der maximalen relativen Abweichung der Zeitreihe der Geschwindigkeitsänderung basierend auf der Längsbeschleunigung des Dewesoft-Systems - Versuch 33-U-01

Anlagen

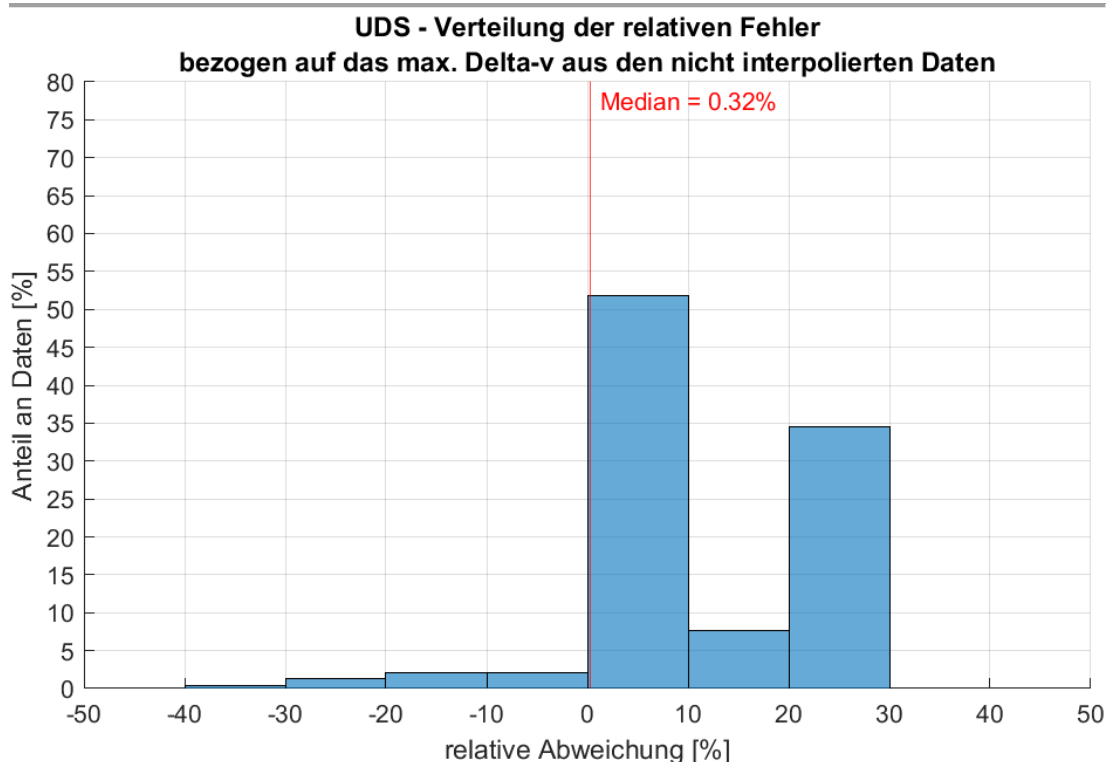


Anlage 128: Verteilung der absoluten Abweichung nach der Interpolation der UDS-Daten in Längsrichtung bezogen auf das Maximum der nicht interpolierten Daten der Datensätze der Polizei Berlin von 2016

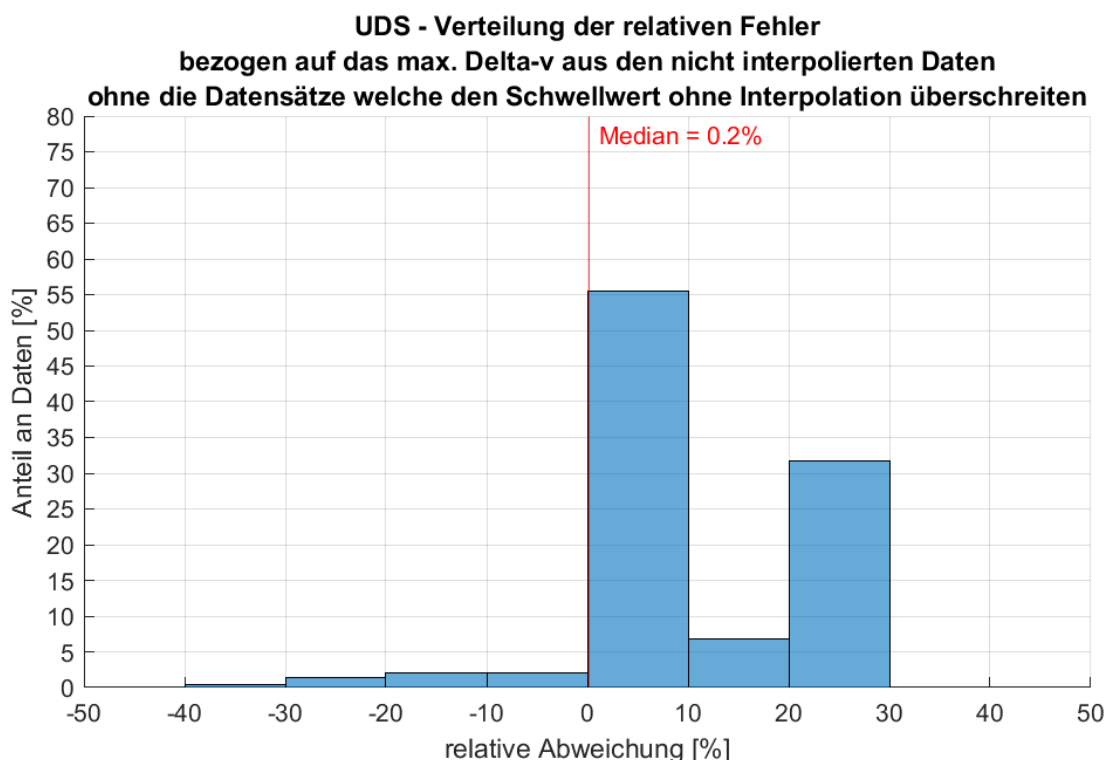


Anlage 129: Verteilung der absoluten Abweichung nach der Interpolation der UDS-Daten in Längsrichtung bezogen auf das Maximum der nicht interpolierten Daten der Datensätze der Polizei Berlin von 2016 ohne die Datensätze, welche den Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms überschreiten

Anlagen

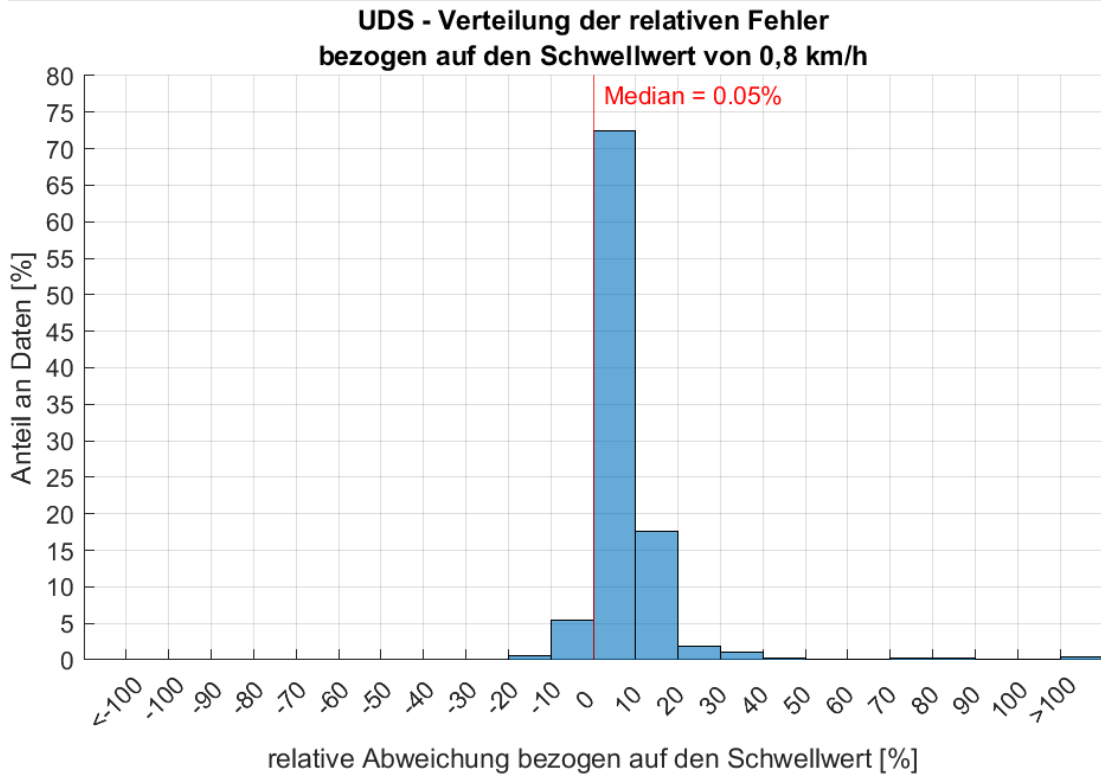


Anlage 130: Verteilung der relativen Abweichung nach der Interpolation der UDS-Daten in Längsrichtung bezogen auf das Maximum der nicht interpolierten Daten der Datensätze der Polizei Berlin von 2016

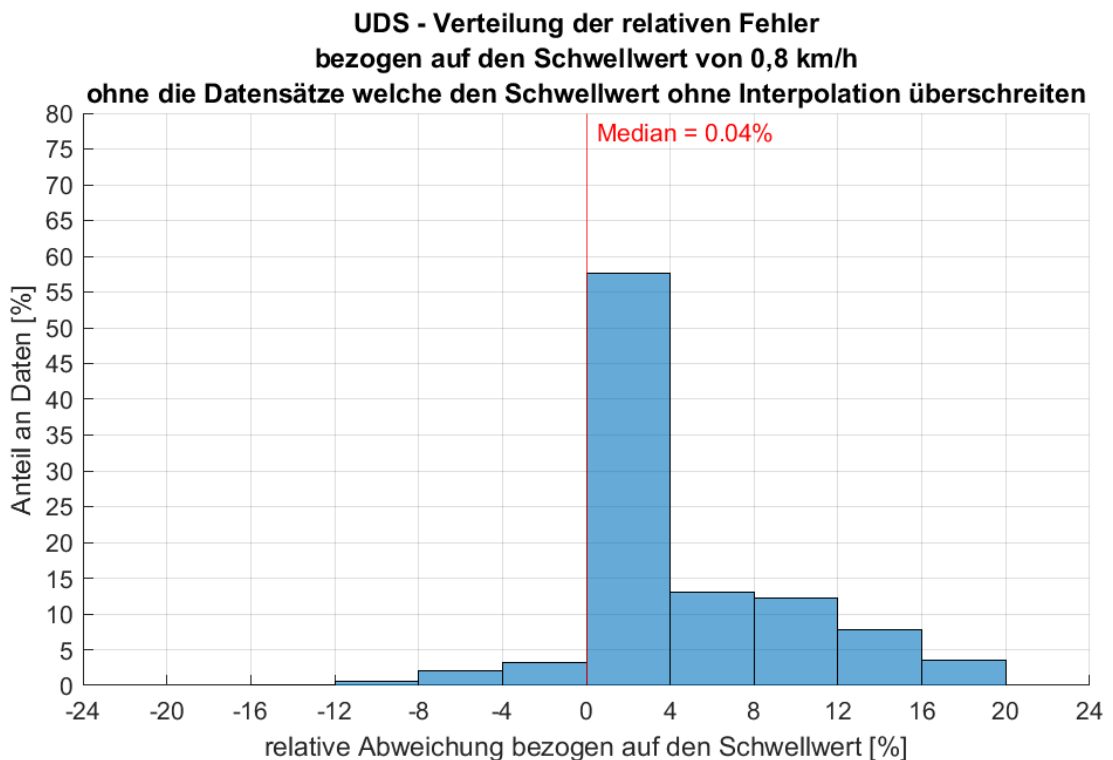


Anlage 131: Verteilung der relativen Abweichung nach der Interpolation der UDS-Daten in Längsrichtung bezogen auf das Maximum der nicht interpolierten Daten der Datensätze der Polizei Berlin von 2016 ohne die Datensätze, welche den Schwellwert von 0, 8km/h innerhalb von 20 ms überschreiten

Anlagen



Anlage 132: Verteilung der relativen Abweichung nach der Interpolation der UDS-Daten in Längsrichtung bezogen auf den Schwellwert von 0,8 km/h der Datensätze der Polizei Berlin von 2016



Anlage 133: Verteilung der relativen Abweichung nach der Interpolation der UDS-Daten in Längsrichtung bezogen auf den Schwellwert von 0,8 km/h der Datensätze der Polizei Berlin von 2016 ohne die Datensätze, welche den Schwellwert von 0,8 km/h innerhalb von 20 ms überschreiten