

Prognose künftiger Pkw-Unfallszenarien im Ortsgebiet durch eine Notbremsfunktion

Masterarbeit zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Technische Universität Graz

Masterstudium Maschinenbau

Institut für Fahrzeugsicherheit

Betreuer: Dipl.-Ing. Dr.techn. Ernst Tomasch

Gerald Sartory, BSc

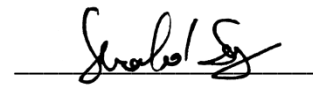
Graz, Februar 2020

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly indicated all material which has been quoted either literally or by content from the sources used.

Graz, am 11.02.2020



Gerald Sartory

ABSTRACT

In the “Valletta Declaration on Road Safety”, the European Union (EU) set itself a target of reducing the number of traffic fatalities. In addition, the EU initially defined a target of halving the number of serious injuries by traffic accidents in 2030 compared to 2020. In order to achieve all targets, the EU set a broad package of measures. Among other arrangements, the package regulates by law that newly registered passenger cars must be equipped with an autonomous emergency braking (AEB) system, driver drowsiness detection and other driver assistance systems starting from May 2022. Therefore, the motivation for this thesis is to provide a forecast for prospective scenarios of road traffic accidents between passenger cars due to an autonomous emergency braking system on urban roads.

Thus real world car-to-car accidents that occurred on urban roads within Europe from the IGLAD-database were analysed.

Subsequently the virtual forward simulation is conducted by using the simulation tool X-RATE. In order to simulate the AEB, the vehicle is equipped with a virtual sensor and an intervention strategy. Four scenarios are considered: Neither of both cars are equipped (scenario 1), only the car that initiated the accident is equipped (scenario 2), only the car that did not initiate the accident is equipped (scenario 3) and both cars are equipped (scenario 4) with a virtual sensor and an intervention strategy. The sensor has a field of view of 360° with a range of 200 m. The time to collision (TTC) is defined as trigger criteria with a value of 1.2 s and is varied in a range from 0.8 to 1.6 s in order to investigate the influence of the TTC in terms of accident avoidance. A brake delay of 0.2 s and a brake gradient of 24.5 m/s^3 are set for the braking system. The maximum deceleration depends on the road condition.

Excluding all accidents with insufficient data 127 out of 295 remain for analysis. All remaining accidents are examined for collision speed, delta-v and collision configuration. Most accidents are avoided in scenario 4 by a total of 61%. 46% of all accidents are avoided in scenario 2 compared to 21% in scenario 3, thus scenario 2 has a significantly higher effectiveness than scenario 3. Avoiding collisions in turning off and turning in / crossing accidents is higher in scenario 2 than in scenario 3. In case of longitudinal traffic accidents, no accident can be avoided in scenario 3 due to a large number of rear-end collisions whereas 60% are preventable in scenario 2. In scenario 4, the difference in effectiveness related to the accident type is small.

Finally, the impact of the TTC is investigated. The accident avoidance is significantly influenced by the TTC and changes in scenario 2 from 17 to 65%, in scenario 3 from 5 to 25% and in scenario 4 from 19 to 78% where the lower accident avoidance corresponds to a TTC of 0.8 s and the higher accident avoidance corresponds to a TTC of 1.6 s.

KURZFASSUNG

Die Europäische Union (EU) hat sich bei der „Valletta Declaration on Road Safety“ neben der Reduzierung von verkehrsunfallbedingten Todesfolgen erstmals auch ein Ziel für die Reduktion der Anzahl an Schwerverletzten festgelegt. Die Zahl der Schwerverletzten im Jahr 2030 bezogen auf das Jahr 2020 soll halbiert werden. Um dieses Ziel zu erreichen sieht die EU ein breites Maßnahmenpaket vor, welches unter anderem ab Mai 2022 die gesetzlich verpflichtende Ausrüstung neu zugelassener Personenkraftwagen (Pkw) mit einer Notbremsfunktion (AEB), einer Müdigkeitserkennung sowie anderer Fahrerassistenzsysteme vorsieht. Die Motivation dieser Arbeit besteht daher darin, das Potenzial von AEB zur Unfallvermeidung bzw. Unfallfolgenmilderung im Ortsgebiet abzuschätzen.

Um diese Frage beantworten zu können werden innerstädtische europäische Realunfalldaten zwischen zwei Personenkraftwagen aus der IGLAD-Datenbank herangezogen und mit PC-Crash rekonstruiert.

Die virtuelle Vorwärtssimulation wird mit dem Simulationstool X-RATE durchgeführt. Zur Simulation des AEB wird das Fahrzeug mit einem virtuellen Sensor und einer Eingriffsstrategie ausgestattet. Es werden vier Szenarien betrachtet: Keines der beiden Fahrzeuge ist ausgestattet (Szenario 1), nur das Fahrzeug des Unfallverursachers ist ausgestattet (Szenario 2), nur das Fahrzeug des nicht unfallverursachenden Unfallbeteiligten ist ausgestattet (Szenario 3) und beide Fahrzeuge sind ausgestattet (Szenario 4). Der Sensor hat ein Sichtfeld von 360° mit einer Reichweite von 200 m. Als Auslösekriterium wird die Zeit zur Kollision (TTC) mit einem Wert von 1,2 s festgelegt und um den Einfluss des TTC auf die Vermeidbarkeit zu untersuchen in einem Wertebereich von 0,8 bis 1,6 s variiert. Für das Bremssystem werden eine Bremsverzögerung von 0,2 s und ein Bremsgradient von $24,5 \text{ m/s}^3$ gewählt. Die maximale Verzögerung hängt vom Fahrbahnzustand ab.

Aufgrund nicht ausreichender Unfalldaten verbleiben 127 von 295 Unfällen für die Bewertung. Die verbleibenden Unfälle werden auf die Kollisionsgeschwindigkeit, das Δv und die Kollisionskonfiguration untersucht. Bei Szenario 4 können mit 61% die meisten Unfälle vermieden werden. Szenario 2 weist mit 46% gegenüber Szenario 3 mit 21% eine deutlich höhere Vermeidbarkeit auf. Es zeigt sich, dass die Vermeidbarkeit bei Abbiegeunfällen sowie bei Einbiegen/Kreuzen-Unfällen bei Szenario 2 höher ist als bei Szenario 3. Bei Unfällen im Längsverkehr ist bei Szenario 3 aufgrund der großen Anzahl an Auffahrunfällen kein Unfall vermeidbar, bei Szenario 2 sind 60% vermeidbar. Bei Szenario 4 ist der Unterschied bezogen auf die Unfalltypen gering.

Abschließend wird der Einfluss des TTC auf die Vermeidbarkeit untersucht. Die Vermeidbarkeit wird maßgeblich durch den TTC beeinflusst und ändert sich bei Szenario 2 von 17 auf 65%, bei Szenario 3 von 5 auf 25% und bei Szenario 4 von 19 auf 78%, wobei die niedrigen Werte einem TTC von 0,8 s und die hohen Werte einem TTC von 1,6 s entsprechen.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINLEITUNG	1
<hr/>		
	Motivation und Ziel	2
2	STAND DER TECHNIK	3
<hr/>		
2.1	Grundlagen der Fahrerassistenzsysteme	3
	Funktionsweise der Notbremsfunktion	6
2.2	Effektivitätsbewertung von Fahrerassistenzsystemen	7
2.2.1	Statistische Erhebung von Daten	7
2.2.2	Virtuelle Simulation der Unfalleinleitungsphase	8
2.2.3	Fahrsimulator	8
2.2.4	Tests am Versuchsgelände oder im Realverkehr	9
2.2.5	Studien zur Bewertung von Notbremsfunktionen	10
2.3	Sensorik für die Umfelderkennung	11
2.3.1	Radar	12
2.3.2	LIDAR	13
2.3.3	Kamera	14
3	METHODE	16
<hr/>		
3.1	Datenfilter	17
3.1.1	IGLAD - Datenbank	17
3.1.2	Filterkriterien	18
3.1.3	Stichprobengröße der Unfälle	19
3.1.4	Unfalldaten	22
3.2	Unfallrekonstruktion	24
3.2.1	Nachmodellierung der Unfallstelle	25
3.2.2	Positionieren der Fahrzeuge	28
3.2.3	Setzen des Stoßpunkts sowie der Berührebene	28
3.2.4	Festlegen der Sequenzen	29
3.2.5	Simulation des Unfallhergangs	31

4	VIRTUELLE VORWÄRTSSIMULATION	32
----------	-------------------------------------	-----------

4.1	Kollisionsmodell von X-RATE	35
4.2	Simulationsvariationen	36
4.3	Sensorkonfiguration	37
4.4	Eingriffsstrategie	39
4.5	Plausibilitätsprüfung	41

5	AUSWERTUNG	45
----------	-------------------	-----------

5.1	Box-Plot	45
5.2	Darstellung der Kollisionskonfiguration	46

6	ERGEBNISSE UND DISKUSSION	54
----------	----------------------------------	-----------

6.1	Stichprobenumfang nach der Plausibilisierung	54
6.2	Gesamtauswertung der Unfälle	56
6.2.1	Vermeidbarkeit nach Hauptkategorie der Unfalltypen	57
6.2.2	Vermeidbarkeit nach Unterkategorie der Unfalltypen	58
6.2.3	Kollisionsgeschwindigkeit	60
6.2.4	Delta-v	62
6.2.5	Kollisionskonfiguration	65
6.2.6	Kollisionswinkel und Gierwinkel	70
6.3	Auswertung nach Unfalltypen	72
6.3.1	Kollisionskonfiguration	73
6.3.2	Kollisionswinkel und Gierwinkel	77
6.3.3	Kollisionsgeschwindigkeit	79
6.3.4	Delta-v	81
6.4	TTC-Variation	83

7	ZUSAMMENFASSUNG	84
----------	------------------------	-----------

8	AUSBLICK	85
----------	-----------------	-----------

9	LITERATURVERZEICHNIS	86
----------	-----------------------------	-----------

Anhang A: Glossar der Grundbegriffe	A-1
Anhang B: Ergebnisse	B-7
Anhang C: Filterkriterien-Katalog	C-106
Anhang D: Unfalltypen-Katalog	D-108
Anhang E: Glossar der IGLAD-Parameter	E-116

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1-1: Entwicklung der Todesfälle (grün) im Vergleich zur Zielvorgabe (blau) in der EU [1]	1
Abbildung 2-1: Automatisierungsstufen nach SAE J3016 [6]	6
Abbildung 2-2: Mögliche Anordnungen beim AEB-Test nach Euro NCAP [17]	9
Abbildung 2-3: Mögliche Anordnung der Umfeldsensoren bei einem autonomen Fahrzeug [23]	11
Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines LIDAR-Sensors	14
Abbildung 2-5: Mögliche Objekte (links) und kritische Objekte (rechts) [24]	15
Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der in der Arbeit verwendeten Methode	16
Abbildung 3-2: Verteilung der IGLAD-Fälle nach Herkunftsland [27]	18
Abbildung 3-3: Stichprobenverteilung der Fahrzeugtypen nach Datenfilter	20
Abbildung 3-4: Stichprobenverteilung der Länder nach Datenfilter	20
Abbildung 3-5: Stichprobenverteilung der Unfalltypen nach Datenfilter	22
Abbildung 3-6: Kombination beider verfügbaren Bildmaterialien der Unfallstelle [29]	26
Abbildung 3-7: Unfallskizze nach PCM-Spezifikation v5.0	27
Abbildung 3-8: Positionierte Fahrzeuge mit Rekonstruktionsfolgespur, Stoßpunkt und Berührebene	29
Abbildung 3-9: Kinematik-Toolbar im befüllten Zustand	30
Abbildung 4-1: Funktionsstruktur des Simulationstools X-RATE	32
Abbildung 4-2: Abweichung beim Ausgangspunkt der Vorwärtssimulation	34
Abbildung 4-3: Abweichung der Fahrzeuge bei einer Simulationszeit von $t = 7$ s	34
Abbildung 4-4: Automatisierte Ermittlung der Berührebene und des Stoßpunkts (POI) durch X-RATE [32]	35
Abbildung 4-5: Einteilung der Unfallbeteiligten in Fahrzeug A und Fahrzeug B	36
Abbildung 4-6: Schematische Darstellung der Funktionsweise des Sensors	37
Abbildung 4-7: Relativgeschwindigkeit zwischen Fahrzeug A und Fahrzeug B	38
Abbildung 4-8: Zeitliche Phasen der Eingriffsstrategie	39
Abbildung 4-9: Verlauf der Bremsverzögerung über die Zeit	40
Abbildung 4-10: Die Eingriffsstrategie dargestellt anhand eines Beispiels	41
Abbildung 4-11: Grenzwerte für die Beschleunigung	43
Abbildung 5-1: Beispiel eines Box-Plots	45
Abbildung 5-2: Kollisionskonfiguration im x',y' -Fahrzeugkoordinatensystem	47
Abbildung 5-3: Unterschied zwischen POI und FPOC	48
Abbildung 5-4: Definition des Kollisionswinkels und des Gierwinkels [34]	48
Abbildung 5-5: Beispiel zur Darstellung der Kollisionskonfiguration	50
Abbildung 5-6: Beispiele für die Änderung des CA aufgrund der Eingriffsstrategie	51
Abbildung 5-7: Verzerrung des Ausgangsfahrzeug als Durchschnitts- oder Einheitsfahrzeug	52
Abbildung 6-1: Verteilung der Länder nach Plausibilisierung	54
Abbildung 6-2: Vergleich der Verteilung der Unfalltypen nach Datenfilter und nach Plausibilisierung	55
Abbildung 6-3: Minderung und Vermeidbarkeit nach Szenarien	56

Abbildung 6-4: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen-Hauptkategorie	57
Abbildung 6-5: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen-Unterkategorie - Szenario 2	58
Abbildung 6-6: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen-Unterkategorie - Szenario 3	59
Abbildung 6-7: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen-Unterkategorie - Szenario 4	59
Abbildung 6-8: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 2	60
Abbildung 6-9: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 3	61
Abbildung 6-10: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 4	62
Abbildung 6-11: Box-Plot des delta-v – Szenario 2	63
Abbildung 6-12: Box-Plot von delta-v – Szenario 3	64
Abbildung 6-13: Box-Plot von delta-v – Szenario 4	65
Abbildung 6-14: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Baseline)	66
Abbildung 6-15: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Szenario 4)	67
Abbildung 6-16: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Baseline)	68
Abbildung 6-17: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Szenario 4)	68
Abbildung 6-18: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur des Fahrzeugs B (Szenario 4)	69
Abbildung 6-19: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur des Fahrzeugs B (Szenario 4)	70
Abbildung 6-20: Änderung von CA und OYA des Fahrzeugs A (Szenario 4)	71
Abbildung 6-21: Änderung von CA und OYA des Fahrzeugs B (Szenario 4)	71
Abbildung 6-22: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 3 - Szenario 2	72
Abbildung 6-23: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 3 - Baseline)	74
Abbildung 6-24: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 3 - Szenario 2)	74
Abbildung 6-25: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 3 - Baseline)	75
Abbildung 6-26: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 3 - Szenario 4)	75
Abbildung 6-27: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur des Fahrzeugs A (Unfalltyp 3 - Szenario 2)	76
Abbildung 6-28: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur des Fahrzeugs B (Unfalltyp 3 - Szenario 2)	77
Abbildung 6-29: Änderung von CA und OYA des Fahrzeugs A (Unfalltyp 3 - Szenario 2)	78
Abbildung 6-30: Änderung von CA und OYA des Fahrzeugs B (Unfalltyp 3 - Szenario 2)	78
Abbildung 6-31: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 2	79
Abbildung 6-32: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit des Fahrzeugs A (Unfalltyp 3 - Szenario 2)	80
Abbildung 6-33: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit des Fahrzeugs B (Unfalltyp 3 - Szenario 2)	80
Abbildung 6-34: Box-Plot von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 2	81
Abbildung 6-35: Verteilung von delta-v des Fahrzeugs A (Unfalltyp 3 - Szenario 2)	82
Abbildung 6-36: Verteilung von delta-v des Fahrzeugs B (Unfalltyp 3 - Szenario 2)	82
Abbildung 6-37: Vermeidbarkeit und Minderung nach TTC	83
Abbildung 9-1: Bremskraftbeiwertverlauf in Abhängigkeit des Fahrbahnzustands [5]	A-5
Abbildung 9-2: Brems- und Seitenkraftbeiwertverlauf (trockene Betonfahrbahn) [5]	A-5
Abbildung 9-3: Kamm'scher Reibungskreis [5]	A-6
Abbildung 9-4: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 2 - Szenario 2	B-7
Abbildung 9-5: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 3 - Szenario 2	B-7

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 9-6: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 5 - Szenario 2	B-8
Abbildung 9-7: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 6 - Szenario 2	B-8
Abbildung 9-8: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 7 - Szenario 2	B-9
Abbildung 9-9: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 2 - Szenario 3	B-10
Abbildung 9-10: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 3 - Szenario 3	B-10
Abbildung 9-11: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 5 - Szenario 3	B-11
Abbildung 9-12: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 6 - Szenario 3	B-11
Abbildung 9-13: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 7 - Szenario 3	B-12
Abbildung 9-14: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 2 - Szenario 4	B-13
Abbildung 9-15: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 3 - Szenario 4	B-13
Abbildung 9-16: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 5 - Szenario 4	B-14
Abbildung 9-17: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 6 - Szenario 4	B-14
Abbildung 9-18: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 7 - Szenario 4	B-15
Abbildung 9-19: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 2	B-16
Abbildung 9-20: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 2 – Szenario 2	B-17
Abbildung 9-21: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 2	B-18
Abbildung 9-22: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 6 – Szenario 2	B-19
Abbildung 9-23: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 3	B-20
Abbildung 9-24: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 2 – Szenario 3	B-21
Abbildung 9-25: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 3	B-22
Abbildung 9-26: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 6 – Szenario 3	B-23
Abbildung 9-27: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 4	B-24
Abbildung 9-28: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 2 – Szenario 4	B-25
Abbildung 9-29: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 4	B-26
Abbildung 9-30: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 6 – Szenario 4	B-27
Abbildung 9-31: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 2 – Fahrzeug A	B-28
Abbildung 9-32: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 2 – Fahrzeug B	B-28
Abbildung 9-33: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 2 – Szenario 2 – Fahrzeug A	B-29
Abbildung 9-34: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 2 – Szenario 2 – Fahrzeug B	B-29
Abbildung 9-35: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 2 – Fahrzeug A	B-30
Abbildung 9-36: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 2 – Fahrzeug B	B-30
Abbildung 9-37: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 6 – Szenario 2 – Fahrzeug A	B-31
Abbildung 9-38: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 6 – Szenario 2 – Fahrzeug B	B-31
Abbildung 9-39: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 3 – Fahrzeug A	B-32
Abbildung 9-40: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 3 – Fahrzeug B	B-32
Abbildung 9-41: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 2 – Szenario 3 – Fahrzeug A	B-33
Abbildung 9-42: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 2 – Szenario 3 – Fahrzeug B	B-33
Abbildung 9-43: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 3 – Fahrzeug A	B-34
Abbildung 9-44: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 3 – Fahrzeug B	B-34

Abbildung 9-45: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 6 – Szenario 3 – Fahrzeug A	B-35
Abbildung 9-46: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 6 – Szenario 3 – Fahrzeug B	B-35
Abbildung 9-47: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 4 – Fahrzeug A	B-36
Abbildung 9-48: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 4 – Fahrzeug B	B-36
Abbildung 9-49: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 2 – Szenario 4 – Fahrzeug A	B-37
Abbildung 9-50: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 2 – Szenario 4 – Fahrzeug B	B-37
Abbildung 9-51: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 4 – Fahrzeug A	B-38
Abbildung 9-52: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 4 – Fahrzeug B	B-38
Abbildung 9-53: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 6 – Szenario 4 – Fahrzeug A	B-39
Abbildung 9-54: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 6 – Szenario 4 – Fahrzeug B	B-39
Abbildung 9-55: Box-Plot von delta-v – Szenario 2	B-40
Abbildung 9-56: Box-Plot von delta-v – Unfalltyp 2 – Szenario 2	B-41
Abbildung 9-57: Box-Plot von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 2	B-42
Abbildung 9-58: Box-Plot von delta-v – Unfalltyp 6 – Szenario 2	B-43
Abbildung 9-59: Box-Plot von delta-v – Szenario 3	B-44
Abbildung 9-60: Box-Plot von delta-v – Unfalltyp 2 – Szenario 3	B-45
Abbildung 9-61: Box-Plot von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 3	B-46
Abbildung 9-62: Box-Plot von delta-v – Unfalltyp 6 – Szenario 3	B-47
Abbildung 9-63: Box-Plot von delta-v – Szenario 4	B-48
Abbildung 9-64: Box-Plot von delta-v – Unfalltyp 2 – Szenario 4	B-49
Abbildung 9-65: Box-Plot von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 4	B-50
Abbildung 9-66: Box-Plot von delta-v – Unfalltyp 6 – Szenario 4	B-51
Abbildung 9-67: Verteilung von delta-v – Szenario 2 – Fahrzeug A	B-52
Abbildung 9-68: Verteilung von delta-v – Szenario 2 – Fahrzeug B	B-52
Abbildung 9-69: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 2 – Szenario 2 – Fahrzeug A	B-53
Abbildung 9-70: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 2 – Szenario 2 – Fahrzeug B	B-53
Abbildung 9-71: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 2 – Fahrzeug A	B-54
Abbildung 9-72: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 2 – Fahrzeug B	B-54
Abbildung 9-73: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 6 – Szenario 2 – Fahrzeug A	B-55
Abbildung 9-74: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 6 – Szenario 2 – Fahrzeug B	B-55
Abbildung 9-75: Verteilung von delta-v – Szenario 3 – Fahrzeug A	B-56
Abbildung 9-76: Verteilung von delta-v – Szenario 3 – Fahrzeug B	B-56
Abbildung 9-77: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 2 – Szenario 3 – Fahrzeug A	B-57
Abbildung 9-78: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 2 – Szenario 3 – Fahrzeug B	B-57
Abbildung 9-79: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 3 – Fahrzeug A	B-58
Abbildung 9-80: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 3 – Fahrzeug B	B-58
Abbildung 9-81: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 6 – Szenario 3 – Fahrzeug A	B-59
Abbildung 9-82: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 6 – Szenario 3 – Fahrzeug B	B-59
Abbildung 9-83: Verteilung von delta-v – Szenario 4 – Fahrzeug A	B-60

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 9-84: Verteilung von delta-v – Szenario 4 – Fahrzeug B	B-60
Abbildung 9-85: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 2 – Szenario 4 – Fahrzeug A	B-61
Abbildung 9-86: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 2 – Szenario 4 – Fahrzeug B	B-61
Abbildung 9-87: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 4 – Fahrzeug A	B-62
Abbildung 9-88: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 4 – Fahrzeug B	B-62
Abbildung 9-89: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 6 – Szenario 4 – Fahrzeug A	B-63
Abbildung 9-90: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 6 – Szenario 4 – Fahrzeug B	B-63
Abbildung 9-91: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Baseline)	B-64
Abbildung 9-92: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Baseline)	B-64
Abbildung 9-93: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 2 - Baseline)	B-65
Abbildung 9-94: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 2 - Baseline)	B-65
Abbildung 9-95: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 3 - Baseline)	B-66
Abbildung 9-96: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 3 - Baseline)	B-66
Abbildung 9-97: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 6 - Baseline)	B-67
Abbildung 9-98: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 6 - Baseline)	B-67
Abbildung 9-99: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Szenario 2)	B-68
Abbildung 9-100: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Szenario 2)	B-68
Abbildung 9-101: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 2 - Szenario 2)	B-69
Abbildung 9-102: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 2 - Szenario 2)	B-69
Abbildung 9-103: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 3 - Szenario 2)	B-70
Abbildung 9-104: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 3 - Szenario 2)	B-70
Abbildung 9-105: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 6 - Szenario 2)	B-71
Abbildung 9-106: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 6 - Szenario 2)	B-71
Abbildung 9-107: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Szenario 3)	B-72
Abbildung 9-108: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Szenario 3)	B-72
Abbildung 9-109: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 2 - Szenario 3)	B-73
Abbildung 9-110: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 2 - Szenario 3)	B-73
Abbildung 9-111: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 3 - Szenario 3)	B-74
Abbildung 9-112: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 3 - Szenario 3)	B-74
Abbildung 9-113: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 6 - Szenario 3)	B-75
Abbildung 9-114: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 6 - Szenario 3)	B-75
Abbildung 9-115: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Szenario 4)	B-76
Abbildung 9-116: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Szenario 4)	B-76
Abbildung 9-117: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 2 - Szenario 4)	B-77
Abbildung 9-118: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 2 - Szenario 4)	B-77
Abbildung 9-119: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 3 - Szenario 4)	B-78
Abbildung 9-120: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 3 - Szenario 4)	B-78
Abbildung 9-121: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 6 - Szenario 4)	B-79
Abbildung 9-122: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 6 - Szenario 4)	B-79

Abbildung 9-123: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Szenario 2 – Fahrzeug A	B-82
Abbildung 9-124: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Szenario 2 – Fahrzeug B	B-82
Abbildung 9-125: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 2 – Szenario 2 – Fahrzeug A	B-83
Abbildung 9-126: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 2 – Szenario 2 – Fahrzeug B	B-83
Abbildung 9-127: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 3 – Szenario 2 – Fahrzeug A	B-84
Abbildung 9-128: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 3 – Szenario 2 – Fahrzeug B	B-84
Abbildung 9-129: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 6 – Szenario 2 – Fahrzeug A	B-85
Abbildung 9-130: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 6 – Szenario 2 – Fahrzeug B	B-85
Abbildung 9-131: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Szenario 3 – Fahrzeug A	B-86
Abbildung 9-132: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Szenario 3 – Fahrzeug B	B-86
Abbildung 9-133: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 2 – Szenario 3 – Fahrzeug A	B-87
Abbildung 9-134: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 2 – Szenario 3 – Fahrzeug B	B-87
Abbildung 9-135: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 3 – Szenario 3 – Fahrzeug A	B-88
Abbildung 9-136: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 3 – Szenario 3 – Fahrzeug B	B-88
Abbildung 9-137: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 6 – Szenario 3 – Fahrzeug A	B-89
Abbildung 9-138: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 6 – Szenario 3 – Fahrzeug B	B-89
Abbildung 9-139: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Szenario 4 – Fahrzeug A	B-90
Abbildung 9-140: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Szenario 4 – Fahrzeug B	B-90
Abbildung 9-141: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 2 – Szenario 4 – Fahrzeug A	B-91
Abbildung 9-142: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 2 – Szenario 4 – Fahrzeug B	B-91
Abbildung 9-143: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 3 – Szenario 4 – Fahrzeug A	B-92
Abbildung 9-144: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 3 – Szenario 4 – Fahrzeug B	B-92
Abbildung 9-145: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 6 – Szenario 4 – Fahrzeug A	B-93
Abbildung 9-146: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 6 – Szenario 4 – Fahrzeug B	B-93
Abbildung 9-147: Änderung von CA und OYA – Szenario 2 – Fahrzeug A	B-94
Abbildung 9-148: Änderung von CA und OYA – Szenario 2 – Fahrzeug B	B-94
Abbildung 9-149: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 2 – Szenario 2 – Fahrzeug A	B-95
Abbildung 9-150: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 2 – Szenario 2 – Fahrzeug B	B-95
Abbildung 9-151: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 3 – Szenario 2 – Fahrzeug A	B-96
Abbildung 9-152: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 3 – Szenario 2 – Fahrzeug B	B-96
Abbildung 9-153: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 6 – Szenario 2 – Fahrzeug A	B-97
Abbildung 9-154: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 6 – Szenario 2 – Fahrzeug B	B-97
Abbildung 9-155: Änderung von CA und OYA – Szenario 3 – Fahrzeug A	B-98
Abbildung 9-156: Änderung von CA und OYA – Szenario 3 – Fahrzeug B	B-98
Abbildung 9-157: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 2 – Szenario 3 – Fahrzeug A	B-99
Abbildung 9-158: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 2 – Szenario 3 – Fahrzeug B	B-99
Abbildung 9-159: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 3 – Szenario 3 – Fahrzeug A	B-100
Abbildung 9-160: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 3 – Szenario 3 – Fahrzeug B	B-100
Abbildung 9-161: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 6 – Szenario 3 – Fahrzeug A	B-101

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 9-162: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 6 – Szenario 3 – Fahrzeug B	B-101
Abbildung 9-163: Änderung von CA und OYA – Szenario 4 – Fahrzeug A	B-102
Abbildung 9-164: Änderung von CA und OYA – Szenario 4 – Fahrzeug B	B-102
Abbildung 9-165: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 2 – Szenario 4 – Fahrzeug A	B-103
Abbildung 9-166: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 2 – Szenario 4 – Fahrzeug B	B-103
Abbildung 9-167: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 3 – Szenario 4 – Fahrzeug A	B-104
Abbildung 9-168: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 3 – Szenario 4 – Fahrzeug B	B-104
Abbildung 9-169: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 6 – Szenario 4 – Fahrzeug A	B-105
Abbildung 9-170: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 6 – Szenario 4 – Fahrzeug B	B-105
Abbildung A-9-171: Legende zum Unfalltypen-Katalog [25]	D-115
Abbildung A-9-172: Einteilung der principal direction of force [25]	E-119
Abbildung A-9-173: Hauptdeformationsbereich des Fahrzeugs [25]	E-119
Abbildung A-9-174: Stoßbedingte Winkeländerung (delta angle) [25]	E-119
Abbildung A-9-175: Horizontale Lage des Unfallschadens [25]	E-120
Abbildung A-9-176: Ermittlung der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung delta-v [25]	E-120

TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 2-1 Einteilung der Wirkungsweisen von Fahrerassistenzsystemen [4]	4
Tabelle 3-1: Auszug aus den Filterkriterien-Katalog	19
Tabelle 3-2: Parameter der IGLAD Datenbank mit dazugehörigen Hauptkategorien [25]	23
Tabelle 3-3: Parameter zur Beschreibung des Stoßvorgangs	29
Tabelle 3-4: Parameter für die Weg-Zeit Berechnung der Unfalleinleitungsphase	30
Tabelle 4-1: Variation der Berechnungsmethoden	33
Tabelle 4-2: Darstellung der in der Arbeit betrachteten Szenarien	36
Tabelle 4-3: Sensorkonfiguration bei der Treatment-Simulation	39
Tabelle 4-4: Schwellzeit in Abhängigkeit der Fahrbahnverhältnisse	40
Tabelle 4-5: Beschleunigungsgrenzwerte in Abhängigkeit des Fahrbahnzustands	43
Tabelle 5-1: Definition der Eckpunkte beim Durchschnittsfahrzeug	49
Tabelle 5-2: Eckpunkte beim Einheitsfahrzeug	51
Tabelle 5-3: Auswirkung der Eingriffsstrategie auf den FPOC	52
Tabelle 5-4: Definition der Eckpunkte in Abhängigkeit der Verzerrung des Fahrzeugs	53
Tabelle 6-1: Vergleich der Länderverteilung mit der Ausgangslage nach Plausibilisierung	55
Tabelle 6-2: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 2	60
Tabelle 6-3: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 3	61
Tabelle 6-4: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 4	62
Tabelle 6-5: Statistische Kennwerte des delta-v – Szenario 2	63
Tabelle 6-6: Statistische Kennwerte von delta-v – Szenario 3	64
Tabelle 6-7: Statistische Kennwerte von delta-v – Szenario 4	65
Tabelle 6-8: Verteilung des FPOC bei Fahrzeug A - Szenario 4	66
Tabelle 6-9: Verteilung des FPOC bei Fahrzeug B - Szenario 4	67
Tabelle 6-10: Verteilung des FPOC bei Fahrzeug A – Unfalltyp 3 - Szenario 2	73
Tabelle 6-11: Verteilung des FPOC bei Fahrzeug B – Unfalltyp 3 - Szenario 2	73
Tabelle 6-12: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 2	79
Tabelle 6-13: Statistische Kennwerte von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 2	81
Tabelle 9-1: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 2	B-16
Tabelle 9-2: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 2 – Szenario 2	B-17
Tabelle 9-3: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 2	B-18
Tabelle 9-4: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 6 – Szenario 2	B-19
Tabelle 9-5: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 3	B-20
Tabelle 9-6: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 2 – Szenario 3	B-21
Tabelle 9-7: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 3	B-22
Tabelle 9-8: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 6 – Szenario 3	B-23
Tabelle 9-9: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 4	B-24

Tabellenverzeichnis

Tabelle 9-10: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 2 – Szenario 4	B-25
Tabelle 9-11: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 4	B-26
Tabelle 9-12: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 6 – Szenario 4	B-27
Tabelle 9-13: Statistische Kennwerte von delta-v – Szenario 2	B-40
Tabelle 9-14: Statistische Kennwerte von delta-v – Unfalltyp 2 – Szenario 2	B-41
Tabelle 9-15: Statistische Kennwerte von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 2	B-42
Tabelle 9-16: Statistische Kennwerte von delta-v – Unfalltyp 6 – Szenario 2	B-43
Tabelle 9-17: Statistische Kennwerte von delta-v – Szenario 3	B-44
Tabelle 9-18: Statistische Kennwerte von delta-v – Unfalltyp 2 – Szenario 3	B-45
Tabelle 9-19: Statistische Kennwerte von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 3	B-46
Tabelle 9-20: Statistische Kennwerte von delta-v – Unfalltyp 6 – Szenario 3	B-47
Tabelle 9-21: Statistische Kennwerte von delta-v – Szenario 4	B-48
Tabelle 9-22: Statistische Kennwerte von delta-v – Unfalltyp 2 – Szenario 4	B-49
Tabelle 9-23: Statistische Kennwerte von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 4	B-50
Tabelle 9-24: Statistische Kennwerte von delta-v – Unfalltyp 6 – Szenario 4	B-51
Tabelle 9-25: Verteilung des FPOC bei Fahrzeug A und B – Szenario 2	B-80
Tabelle 9-26: Verteilung des FPOC bei Fahrzeug A und B – Szenario 3	B-80
Tabelle 9-27: Verteilung des FPOC bei Fahrzeug A und B – Szenario 4	B-81
Tabelle A-9-28: Auflistung der Filterkriterien des Filter 5	C-106
Tabelle A-9-29: Unfalltypen-Katalog – Unfalltyp 1 [25]	D-108
Tabelle A-9-30: Unfalltypen-Katalog – Unfalltyp 2 [25]	D-109
Tabelle A-9-31: Unfalltypen-Katalog – Unfalltyp 3 [25]	D-110
Tabelle A-9-32: Unfalltypen-Katalog – Unfalltyp 4 [25]	D-111
Tabelle A-9-33: Unfalltypen-Katalog – Unfalltyp 5 [25]	D-112
Tabelle A-9-34: Unfalltypen-Katalog – Unfalltyp 6 [25]	D-113
Tabelle A-9-35: Unfalltypen-Katalog – Unfalltyp 7 [25]	D-114

FORMELVERZEICHNIS

Formel 2-1: Ermittlung des Abstands d bei der Puls-Modulation [9]..... 12

Formel 3-1: Ermittlung der Beschleunigung [28] 24

Formel 3-2: Zusammenhang beider Reifenkräfte [28] 24

Formel 3-3: Ermittlung der Geschwindigkeit [28] 24

Formel 3-4: Zusammenhang der Reifenkräfte [28] 25

Formel 4-1: Ermittlung der Relativgeschwindigkeit [2]..... 38

Formel 4-2: Referenzwert für die Eingriffsstrategie..... 38

Formel 4-3: Ermittlung der build-up time [5] 40

Formel 4-4: Ermittlung der Querbeschleunigung [2] 42

Formel 4-5: Annahme für a_q in Abhängigkeit des Fahrbahnzustands 42

Formel 5-1: Berechnung des oberen Whisker [33] 46

Formel 5-2: Berechnung des unteren Whisker [33]..... 46

Formel 5-3: Berechnung der neuen x-Koordinate 49

Formel 5-4: Berechnung der neuen y-Koordinate 49

Formel 9-1: Ermittlung des EES [35] A-1

Formel 9-2: Ermittlung des Δv [2] A-1

Formel 9-3: Ermittlung des TTC [4] A-2

Formel 9-4: Ermittlung des Bremschlupf [5] A-2

Formel 9-5: Ermittlung des Bremskraftbeiwertes [5] A-3

Formel 9-6: Ermittlung des Seitenkraftbeiwertes [5] A-3

Formel 9-7: Ermittlung der Gesamtkraft [38] A-4

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

ABP	Automatic Brake Prefill
ABS	Antiblockiersystem
ACC	Adaptive Cruise Control
ADAS	Advanced Driver Assistance Systems
AEB	Autonomous Emergency Braking
AV	Automated Vehicle
BL	Baseline
CA	Collision angle
CDC	Collision Deformation Classification
CEDATU	Central Database for In-Depth Accident Study
CV	Conventional Vehicle
DDT	Dynamic Driving Tasks
DSD	Dr. Steffan Datentechnik
EES	Energy Equivalent Speed
ESP	Elektronisches Stabilitätsprogramm
EU	Europäische Union
FoV	Field of View
GVT	Global Vehicle Target
IGLAD	Initiative for the global harmonisation of accident data
LIDAR	Light Detection and Ranging
NBA	Notbremsassistent
NCAP	New Car Assessment Programme
ODD	Operational Design Domain
OYA	Opponent Yaw Angle
PBA	Predictive Brake Assist
PCM	Pre-Crash Matrix
PCW	Predictive Collision Warning
PDOF	Principle Direction of Force
PEB	Predictive Emergency Braking
FPOC	First Point of contact
POI	Point of impact
SD	Standard Deviation
TDC	Truck Deformation Classification
TTC	Time To Collision
VSI	Vehicle Safety Institute
WGS	World Geodetic System
X-RATE	Extended Effectiveness Rating of Advanced Assistance Systems

1 EINLEITUNG

Im Zeitraum von 2010 bis 2017 hat sich die Anzahl an Verkehrstoten innerhalb Europas um 20%, sowie die Anzahl der Schwerverletzten um 5% verringert. Es ist daher sehr unwahrscheinlich, dass die Europäische Union (EU) das festgelegte Ziel einer Reduktion der verkehrsunfallbedingten Todesfolgen von 50% im Zeitraum 2010 bis 2020 erreichen wird, siehe Abbildung 1-1. Trotz dieser Aussicht will die EU an ihrem langfristigen Ziel, die Anzahl der verkehrsunfallbedingten Todesfolgen bis zum Jahr 2050 auf nahezu null zu reduzieren, festhalten. Durch die „Valletta Declaration on road safety“ wurde zusätzlich erstmals ein Ziel für die Reduktion der Anzahl an Schwerverletzten festgelegt. Bezogen auf das Jahr 2020 soll die Anzahl an Schwerverletzten 2030 halbiert werden. [1]

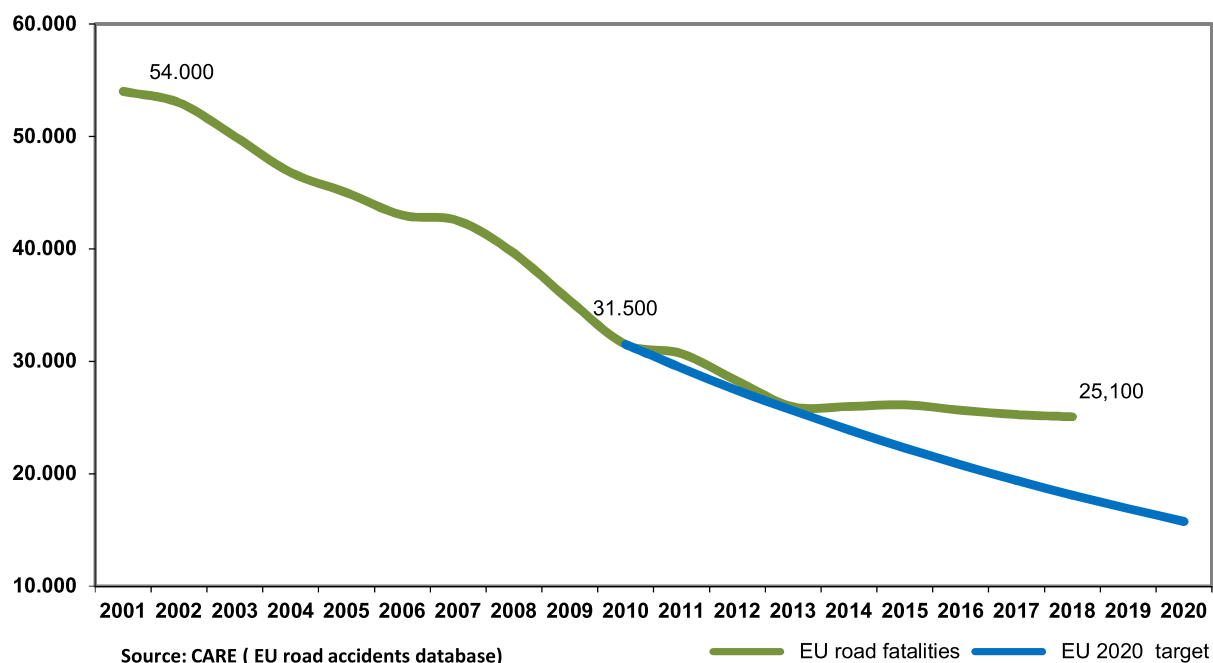


Abbildung 1-1: Entwicklung der Todesfälle (grün) im Vergleich zur Zielvorgabe (blau) in der EU [1]

Um die oben genannten Ziele zu erreichen sieht die EU unter anderem im Bereich der Fahrzeugsicherheit einige Maßnahmen vor, welche die aktive und passive Sicherheit betreffen. [1] Passive Sicherheit beinhaltet Maßnahmen, welche die Unfallfolgen mindern sollen, wie zum Beispiel der Sicherheitsgurt oder der Einsatz von Airbags. Unter aktiver Sicherheit versteht man Maßnahmen zur Vermeidung von Unfällen, dazu zählt beispielsweise die Ausstattung von Fahrzeugen mit ABS. [2]

Im Bereich der aktiven Sicherheit sieht die EU die Notbremsfunktion (Advanced Emergency Braking) als einen der Schlüsselindikatoren zur Erreichung der gesetzten Ziele. Die EU kooperiert mit Euro NCAP (European New Car Assessment Programme) um gesetzliche Anforderungen abzuleiten. [1] Eine Pressemitteilung der EU vom April 2019 bestätigt, dass das Advanced Emergency Braking System ab Mai 2022 zusammen mit anderen Fahrerassistenzsystemen gesetzlich verpflichtend sein wird. [3]

Motivation und Ziel

Auf Grund der ambitionierten Ziele bezüglich der Reduktion der Schwerverletzten sowie Toten im Straßenverkehr [1] hat die EU ein Maßnahmenpaket vorgestellt, welches unter anderem die gesetzlich verpflichtende Ausrüstung neu zugelassener Personenkraftfahrzeuge mit einer Notbremsfunktion sowie anderen Fahrerassistenzsystemen wie beispielsweise einer Müdigkeitserkennung, einem intelligenten Geschwindigkeitsassistenten aber auch einer Alkohol-Zündschlossperre beinhaltet. [3] Da die EU unter anderem mit diesem Maßnahmenpaket ihre festgelegten Ziele erreichen will, ist es daher von großem Interesse deren Effektivität im Unfallgeschehen abzuschätzen. Folglich ist das Ziel der Arbeit, eine Prognose über künftige Pkw-Unfallszenarien im Ortsgebiet durch eine Notbremsfunktion zu geben. Aus diesem Ziel leiten sich folgende Forschungsfragen ab:

- Welche Unfallszenarien können vermieden oder in Bezug auf die Kollisionsgeschwindigkeit gemindert werden?
- Wie verändert sich die Kollisionsgeschwindigkeit sowie die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung bei den nicht-vermeidbaren Unfällen?
- Wie verändert sich die Kollisionskonfiguration (Kollisionswinkel zueinander, Lage des Erstkontaktpunkts, ...) bei den nicht-vermeidbaren Unfällen?

Die Bewertung der Forschungsfragen erfolgt durch eine virtuelle Vorwärtssimulation. Neben der Gesamtauswertung erfolgt auch eine Betrachtung nach Unfalltypen.

2 STAND DER TECHNIK

In diesem Kapitel soll ein Einblick über das in der Arbeit benötigte Fachwissen sowie den aktuellen Stand der Technik gegeben werden. Zunächst wird ein kurzer Überblick über die Grundlagen der Fahrerassistenzsysteme, sowie über die Funktionsweise der Notbremsfunktion gezeigt. Als nächstes werden mögliche Methoden zur Unfallbewertung aufgezeigt und einige Studien über die Unfallvermeidung durch eine Notbremsfunktion betrachtet. Abschließend wird die zur Umfelderkennung benötigte Umfeldsensorik beschrieben. Die für die Arbeit benötigten Grundbegriffe der Unfallrekonstruktion, der Fahrerassistenzsysteme und der Kraftübertragung des Reifens sind als Glossar im Anhang A zusammengefasst.

2.1 Grundlagen der Fahrerassistenzsysteme

Fahrerassistenzsysteme sind definiert als Systeme, welche den Fahrer bei der Führung des Fahrzeugs unterstützen. Es erfolgt eine Aufgabenteilung zwischen Mensch und Maschine. Je nach Anwendungsgebiet liegt der Fokus auf Komfort oder Sicherheit. [4]

Die Aufgabe einer bremsbasierten Assistenzfunktion besteht darin, dass das Fahrzeug in extremen Fahrsituationen, wie bei einer Vollbremsung, beherrschbar bleibt. Der Fokus dieser Funktion liegt auf der Sicherheit. Ein Beispiel ist das ABS (Antiblockiersystem), welches durch Eingriff in die Bremsanlage und in das Motormanagement den Reifenschlupf so regelt, dass das Fahrzeug einen möglichst kurzen Bremsweg bei gleichzeitiger Erhaltung des Seitenführungsvermögens erreicht. Weitere Beispiele für Systeme mit Fokus auf Sicherheit sind das „Automatic Brake Prefill“ (ABP) sowie die Notbremsfunktion. Diese nützen zusätzlich zur Bremsanlage die Umfeldsensorik, wie zum Beispiel radarbasierte Systeme, um Informationen über die Umgebung zu erhalten. Dadurch ist es den Assistenzfunktionen möglich Gefahren durch andere Verkehrsteilnehmer oder Hindernisse zu detektieren. [4, 5] Ein Beispiel für ein Assistenzsystem mit Fokus auf Komfort ist das ACC (Adaptive Cruise Control). [4]

Aufgrund der Anforderungen an ein Fahrerassistenzsystem wird ein System je nach Wirkungsweise in eine der drei Hauptkategorien eingeteilt, siehe Tabelle 2-1: [4]

- Informierende und warnende Funktionen
- Kontinuierlich automatisierende Funktionen
- Eingreifende Notfallfunktionen

Tabelle 2-1 Einteilung der Wirkungsweisen von Fahrerassistenzsystemen [4]

Kategorie A	Kategorie B	Kategorie C
Informierende und warnende Funktionen	Kontinuierlich automatisierende Funktionen	Eingreifende Notfallfunktionen (unfallgeneigte Situation)
Wirken ausschließlich „mittelbar“ über den Fahrer auf die Fahrzeugführung	Haben unmittelbaren Einfluss auf die Fahrzeugsteuerung (bewusste Übertragung durch den Fahrer – arbeitsteilige Ausführung). Immer übersteuerbar, i.d.R. Komfortfunktionen	Haben unmittelbaren Einfluss auf die Fahrzeugsteuerung in unfallgeneigten Situationen, die der Fahrer faktisch nicht mehr kontrollieren kann (i.d.R. Sicherheitsfunktionen)
Gestaltungsbeispiele: <ul style="list-style-type: none"> • Verkehrszeichenassistent (bspw. Anzeige der Geschwindigkeitsbegrenzung) • Spurverlassenswarnung (bspw. Vibration am Lenkrad) 	Gestaltungsbeispiele: <ul style="list-style-type: none"> • Adaptive Geschwindigkeitsregelung (ACC) • Spurhalteassistent (über Lenkeingriffe) 	Gestaltungsbeispiele: <ul style="list-style-type: none"> • Automatisches Notbremsensystem (systeminitiiert) • Ausweichsystem • Nothaltesystem (Fahrer handlungsunfähig)

Unter Kategorie A fallen Systeme bei denen der Fahrer die Information vom Assistenzsystem aufnimmt, jedoch selbst die Fahrzeugführung behält. Über eine Mensch-Maschine-Schnittstelle werden dem Fahrer Informationen übermittelt. Ein Beispiel ist die Vibration des Lenkrads bei einem Spurhalteassistenten. [4]

Die Kategorie B beinhaltet Funktionen, welche unmittelbar in die Fahrzeugführung eingreifen. Sie stellen eine redundant-parallele Form der Arbeitsteilung zwischen Mensch und Maschine dar. Das bedeutet, der Mensch ist jederzeit in der Lage wieder die volle Fahrzeugführung zu übernehmen. Änderungen durch das Fahrerassistenzsystem an der Fahrzeugführung sind für den Fahrer jederzeit wahrnehmbar. Ein Beispiel ist der Spurhalteassistent. [4]

Bei der Kategorie C übernimmt das Fahrerassistenzsystem fahrzeugführende Funktionen im Falle einer Notfallsituation. Darunter versteht man Situationen, bei denen der Fahrer aufgrund menschlicher Faktoren eine höhere Reaktionszeit als das eingreifende System besitzt. Die Unfähigkeit des Handelns durch den Fahrer bewirkt, dass das System als einzige Führung der Funktion bleibt. Beispiel ist eine systeminitiierte automatische Notbremsung, bei der der Fahrer aufgrund seiner Reaktionsfähigkeit nicht mehr in der Lage ist rechtzeitig eine Bremsung einzuleiten. Das System übernimmt die Funktion der Fahrzeugverzögerung vollständig, der Fahrer hat keine Möglichkeit mehr die Fahrzeugverzögerung zu beeinflussen. [4]

Die Stufen des autonomen Fahrens beziehungsweise wie viele fahrdynamische Aufgaben „dynamic driving tasks“ (DDT) von einem Fahrerassistenzsystem übernommen werden, ist durch den SAE J3016 Standard beschrieben. Der Standard unterteilt die DDT in operative und taktische Aufgaben. Während Eingriffe in die Fahrzeugführung operative Maßnahmen darstellten, ist beispielsweise die

Fahrmanöverplanung eine taktische Maßnahme. Die Einteilung der einzelnen Stufen ist in Abbildung 2-1 dargestellt. Die DDT umfasst folgende Aufgaben: [6]

- Die longitudinale Fahrzeugführung über Beschleunigung und Verzögerung (operativ)
- Die laterale Fahrzeugführung durch das Lenken (operativ)
- Das Erfassen der Umwelt durch Sensorik für die Umwelterkennung („object and event detection and response (OEDR)“ (operativ und taktisch)
- Die Reaktion auf ein Ereignis und/oder ein Objekt (operativ und taktisch)
- Fahrmanöverplanung (taktisch)
- Auffälligkeit erhöhen, z.B. durch Beleuchten oder Signalisieren (taktisch)

Ob die Funktion des automatisierten Fahrens eines Fahrzeugs an eine spezielle begrenzte geographische Zone gebunden ist, wird durch das „operational design domain (ODD)“ angegeben. Die Einteilung erfolgt in die Stufen null bis fünf. Die Stufe null bedeutet keine Automatisierung. Das heißt, dass die DDT vollständig vom Fahrer übernommen wird. In dieser Stufe fallen Fahrerassistenzsysteme wie das ABS oder ESP. Der Fahrer führt das Fahrzeug eigenständig, kann jedoch von einem System unterstützt werden. [6]

Die Stufen eins bis fünf des SAE Standards beschreiben Fahrerassistenzsysteme der Kategorie B, da diese Fahrerassistenzsysteme dauerhaft in die Fahrzeugführung eingreifen. [7] In der Stufe eins übernimmt das Fahrzeug die laterale oder die longitudinale Fahrzeugführung. In einer Notfallsituation muss der Fahrer als „fallback“ verfügbar sein. Er muss also jederzeit in der Lage sein die Fahrzeugführung zu übernehmen. Ein Beispiel hierfür ist das ACC. Bei der Stufe zwei übernehmen mehrere Fahrerassistenzsysteme beide Aufgaben, zum Beispiel die Kombination aus Spurhalteassistent und ACC. In der Stufe drei muss der Fahrer nur mehr nach einer Mitteilung des Systems als „fallback“ reagieren. Ein Beispiel dafür ist das automatisierte Fahren auf einer Autobahn. [4, 6] Eine genaue Zeitdauer bis wann ein Fahrer bereit sein muss die Fahrfunktionen übernehmen zu können, ist jedoch nicht definiert. [7] Bei der Stufe vier fällt der Fahrer komplett weg. Dies erfolgt jedoch nur in begrenzten geographischen Zonen („geofenced locations“). Bei der Stufe fünf kann das System den Fahrer in jeglicher Hinsicht ersetzen. [6]

Level	Name	Narrative definition	DDT		DDT fallback	ODD
			Sustained lateral and longitudinal vehicle motion control	OEDR		
Driver performs part or all of the DDT						
0	No Driving Automation	The performance by the <i>driver</i> of the entire <i>DDT</i> , even when enhanced by <i>active safety systems</i> .	<i>Driver</i>	<i>Driver</i>	<i>Driver</i>	n/a
1	Driver Assistance	The <i>sustained</i> and <i>ODD</i> -specific execution by a <i>driving automation system</i> of either the <i>lateral</i> or the <i>longitudinal vehicle motion control</i> subtask of the <i>DDT</i> (but not both simultaneously) with the expectation that the <i>driver</i> performs the remainder of the <i>DDT</i> .	<i>Driver and System</i>	<i>Driver</i>	<i>Driver</i>	Limited
2	Partial Driving Automation	The <i>sustained</i> and <i>ODD</i> -specific execution by a <i>driving automation system</i> of both the <i>lateral</i> and <i>longitudinal vehicle motion control</i> subtasks of the <i>DDT</i> with the expectation that the <i>driver</i> completes the <i>OEDR</i> subtask and <i>supervises the driving automation system</i> .	System	<i>Driver</i>	<i>Driver</i>	Limited
ADS (“System”) performs the entire DDT (while engaged)						
3	Conditional Driving Automation	The <i>sustained</i> and <i>ODD</i> -specific performance by an <i>ADS</i> of the entire <i>DDT</i> with the expectation that the <i>DDT fallback-ready user</i> is <i>receptive to ADS-issued requests to intervene</i> , as well as to <i>DDT performance-relevant system failures</i> in other <i>vehicle systems</i> , and will respond appropriately.	<i>System</i>	System	<i>Fallback-ready user (becomes the driver during fallback)</i>	Limited
4	High Driving Automation	The <i>sustained</i> and <i>ODD</i> -specific performance by an <i>ADS</i> of the entire <i>DDT</i> and <i>DDT fallback</i> without any expectation that a <i>user</i> will respond to a <i>request to intervene</i> .	<i>System</i>	<i>System</i>	System	Limited
5	Full Driving Automation	The <i>sustained</i> and unconditional (i.e., not <i>ODD</i> -specific) performance by an <i>ADS</i> of the entire <i>DDT</i> and <i>DDT fallback</i> without any expectation that a <i>user</i> will respond to a <i>request to intervene</i> .	<i>System</i>	<i>System</i>	<i>System</i>	Unlimited

Abbildung 2-1: Automatisierungsstufen nach SAE J3016 [6]

Funktionsweise der Notbremsfunktion

Unter der Notbremsfunktion, auch „Autonomous Emergency Braking“ (AEB) oder „Predictive Emergency Braking“ (PEB) genannt, versteht man Systeme welche nach dem Erkennen einer Notfallsituation automatisiert eine Notbremsung bis in den ABS-Regelbereich durchführen. [4] Je nach Hersteller gibt es unterschiedliche Ausführungen der Notbremsfunktion. Unabhängig der Ausführungsform werden immer ein oder mehrere Sensoren für die Umfelderkennung benötigt. Eine mögliche Ausführung ist die Kombination aus einem Radarsystem, welches sich auf Höhe des Kühlergrills befindet und einer Stereokamera, welche sich auf Höhe des Rückspiegels innerhalb der Frontscheibe befindet. Zusätzlich zur Umfeldsensorik benötigt die Notbremsfunktion das Bremssystem um die nötige Bremsverzögerung zu erzeugen. Es nutzt dafür die Funktionalitäten des ESP (Elektronisches Stabilitätsprogramm). [8, 9]

Das prinzipielle Vorgehen der Notbremsfunktionen verschiedener Hersteller ist sehr ähnlich. Folgend wird ein System der Robert Bosch GmbH als Beispiel für die Funktionsweise beschrieben. Als erster Schritt erfolgt vor der eigentlichen Notbremsung die Vorbereitung der Bremsanlage mit dem sogenannten PBA (Predictive Brake Assist). Das Fahrzeug nutzt den Radarsensor sowie die Kamera, um eine Gefahrensituation festzustellen. Bei unfallkritischen Situationen bereitet das System das Bremssystem auf eine starke Bremsung vor, indem es den Bremsdruck soweit aufbaut, bis sich die Bremsbeläge an die Bremsscheiben anlegen. [9]

Sofern es die Situation zulässt und die gefahrene Geschwindigkeit über 30 km/h liegt, wird im nächsten Schritt der Fahrer gewarnt. [8] Dies erfolgt durch die PCW (Predictive Collision Warning). Der Fahrer wird optisch und/oder akustisch gewarnt. Auf diese Warnung folgt ein kurzer und starker Bremsdruck. Ein typisches Szenario ist eine Auffahrsituation, bei der in ca. 52% der Fälle gar nicht reagiert wird. [9] Liegt die Geschwindigkeit unter 30 km/h wird dieser Schritt nicht durchgeführt, sondern direkt eine automatisierte Notbremsung eingeleitet. [8]

Sofern eine Reaktion des Fahrers stattfindet, berechnet das System, ob die durch den Fahrer vorgegebene Verzögerung, ausreicht. Sofern diese nicht ausreicht, unterstützt das System den Fahrer und erhöht automatisch die Bremsleistung des Fahrzeugs. Reagiert der Fahrer gar nicht und eine Kollision ist unvermeidbar, reagiert das System und leitet eine automatisierte Notbremsung mit maximaler Fahrzeugverzögerung ein. [8]

2.2 Effektivitätsbewertung von Fahrerassistenzsystemen

Um die Effektivität eines Fahrerassistenzsystems (ADAS) auf die Vermeidung von Verkehrsunfällen zu beurteilen, gibt es verschiedene Herangehensweisen. Ein Auszug dieser wird im Folgenden beschrieben.

2.2.1 Statistische Erhebung von Daten

In vielen Ländern werden statistische Daten von der Polizei im Zuge der Unfallaufnahme erfasst. Die Unfalldaten werden genutzt, um nationale Statistiken über Unfälle zu erstellen. Auch von Versicherungen werden Daten erfasst und statistisch ausgewertet. Aufgrund der meist fehlenden Tiefe an Information ist es auf Basis dieser Daten nur begrenzt möglich, eine Effektivitätsbewertung der Fahrerassistenzsysteme durchzuführen. [2, 10]

Ein Beispiel zur Effektivitätsbewertung durch die Erhebung von statistischen Daten stellt die Studie von Isaksson-Hellman and Lindman 2012 [11] dar. In dieser Studie wurden schwedische Versicherungsfälle des Volvo XC60, welche mit dem System City Safety ausgestattet sind, mit anderen Autos des gleichen Herstellers ohne System verglichen. City Safety ist ein System welches durch einen LIDAR-Sensor das

Fahrzeugheck eines vorausfahrenden Fahrzeugs erkennt und automatisiert eine Notbremsung einleitet. Die Studie zeigt eine Reduzierung der Heckaufprallkollisionen um 23%.

Die Effektivitätsbewertung eines Fahrerassistenzsystems durch statistische Daten kann nur in Folge des realen Unfallgeschehen durchgeführt werden. Dadurch kann keine zuverlässige Aussage über neue ADAS-Systeme getroffen werden, welche noch nicht oder nur zu einem sehr kleinen Anteil im Realverkehr vertreten sind. [12]

2.2.2 Virtuelle Simulation der Unfalleinleitungsphase

Die virtuelle Simulation bietet gegenüber der statistischen Erhebung den Vorteil, dass auch neue ADAS-Funktionen getestet werden können. [12] Bei der virtuellen Simulation werden die Fahrzeuge mit oder ohne ADAS-Funktion simuliert. Dabei können sowohl die Strategie als auch die Anzahl und Art der Sensoren variiert werden. Abschließend werden die Ergebnisse der Simulation miteinander verglichen und bewertet. [13]

Ein Beispiel für die virtuelle Vorwärtssimulation ist die Studie von Kolk et al. 2016 [14]. In der Studie wurde untersucht, wie sich die Ausstattung von kleinen Elektrofahrzeugen (L7e) mit einem Kollisionsminderungssystem auswirkt. Dabei wurden Realunfalldaten herangezogen und ein Fahrzeug durch ein L7e ersetzt. Es wurden verschiedene Sensorsysteme untersucht und es kann eine Vermeidbarkeit in Abhängigkeit des Systems von 47% bis 66,5% abgeleitet werden.

2.2.3 Fahrsimulator

Ein Fahrsimulator bildet ein reales Fahrzeug durch typische Fahrzeugbedienelemente wie das Lenkrad nach. Je nach Art des Simulators werden bei einer Simulation neben der Visualisierung der Umgebungsbedingungen auch die Fahrdynamik nachgebildet. [4] Fahrsimulatorversuche zeichnen sich durch eine hohe Reproduzierbarkeit und der präzisen Einstellbarkeit aus. Durch das digitale Umfeld ist es möglich verschiedene Unfallsituationen sowie unterschiedliche Systemparameter nachzustellen. [13] Die Einschränkung des Systems besteht im Versuchsdesign und durch technische Einschränkungen. Beispielsweise benötigen die Fahrsimulatoren leistungsfähige Soft- und Hardware. [4]

Die Untersuchung von Bella und Russo (2011) [15] ist ein Beispiel für die Bewertung von Fahrerassistenzsystemen durch Fahrsimulatorversuche. In dieser Studie wurde mittels eines Festsitz-Simulators das Verhalten des Fahrers auf ein Kollisionswarnungssystem bei Heckaufprallkollisionen untersucht. Der Versuch wurde für vier verschiedene Szenarien auf einer zweispurigen Landstraße durchgeführt und aus den Erkenntnissen ein neuer Algorithmus für das Kollisionswarnsystem entwickelt.

2.2.4 Tests am Versuchsgelände oder im Realverkehr

Eine weitere Möglichkeit der Effektivitätsbewertung bietet ein Realversuch am Versuchsgelände oder im Realverkehr. [4] Im Vergleich zum Fahr Simulator bestehen bei dieser Art des Testens keine Einschränkungen bezüglich der Fahrdynamik. [13] Aufgrund der hohen Komplexität kann eine Abstraktion der zu prüfenden Szenarien erforderlich sein, um die Sicherheit und Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. [4]

Ein Test am Versuchsgelände wird beispielsweise durch den Euro NCAP zur Bewertung der Notbremsfunktion (AEB) von neu zugelassenen Fahrzeugen durchgeführt. Der Euro NCAP ist eine Organisation welche derzeit aus 12 Mitgliedern besteht. Mitglieder sind europäische Verkehrsministerien, Versicherungsverbände sowie Automobilclubs. [16] Die Effektivitätsprüfung erfolgt mithilfe von Testprotokollen, welche auf der Auswertung und Bewertung von Verkehrsunfällen basieren und ständig weiterentwickelt werden. Im Jahr 2019 wird nach dem AEB-Testprotokoll (Version 2.0.1) [17] sowie dem AEB-Testprotokoll für ungeschützte Verkehrsteilnehmer (Version 2.0.2) getestet. [18]

Das AEB-Testprotokoll teilt sich in AEB City sowie AEB Inter-Urban auf. Beim AEB City-Test fährt das Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit zwischen 10 und 50 km/h auf einen stationären dreidimensionalen Fahrzeugdummy, bezeichnet als Global Vehicle Target (GVT), auf und soll den Zusammenstoß durch das automatische Einleiten einer Vollbremsung verhindern. Die Versuche werden mit unterschiedlichen Überdeckungen bezogen auf das GVT durchgeführt, dargestellt in Abbildung 2-2. Beim AEB Inter-Urban-Test fährt das Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit im Bereich von 30 bis 80 km/h auf den GVT auf, welcher sich entweder selbst mit einer Geschwindigkeit im Bereich von 30 bis 80 km/h bewegt oder steht. Ebenso wird ein Szenario abgebildet bei dem das vordere Fahrzeug eine leichte oder stärkere Bremsung von einer Ausgangsgeschwindigkeit von 50 km/h einleitet. Hier wird ebenso mit unterschiedlichen Überdeckungen gearbeitet. [17]

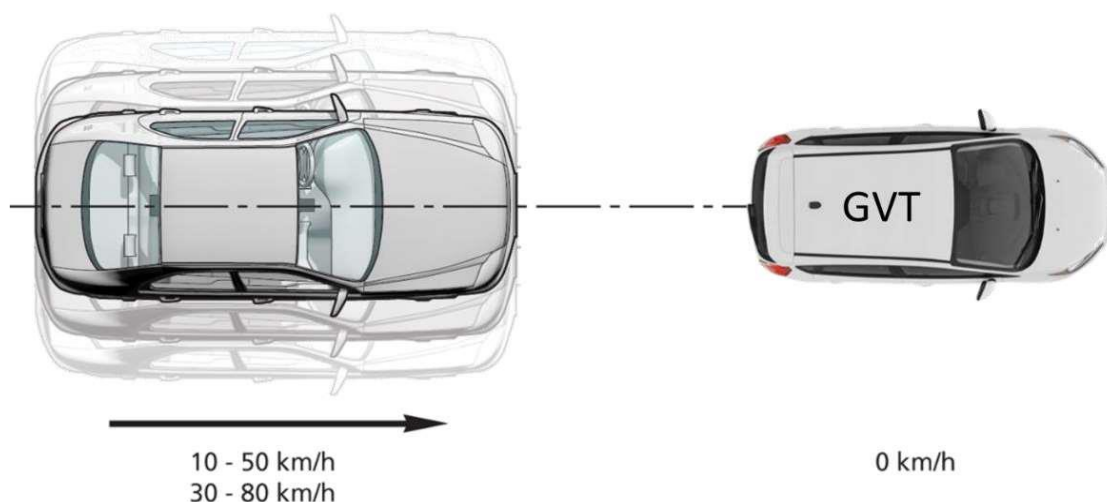


Abbildung 2-2: Mögliche Anordnungen beim AEB-Test nach Euro NCAP [17]

2.2.5 Studien zur Bewertung von Notbremsfunktionen

In den Kapiteln 2.2.1 und 2.2.2 wurden bereits zwei Studien, welche die Effektivität von Notbremsfunktionen bewerten, erläutert. In diesem Kapitel werden einige weitere Studien näher betrachtet.

Sander (2016) [19] hat die Auswirkung der Notbremsfunktion bei Abbiegeunfällen untersucht. In der Untersuchung wurde zusätzlich eine Variation der zu erwartenden Lenkmanöver durchgeführt. Bei den betrachteten Szenarien überquerte das abbiegende Fahrzeug die Trajektorie des entgegenkommenden Fahrzeuges. In dieser Studie wurde gezeigt, dass die Ausstattung des abbiegenden Fahrzeugs mit einem AEB-System ein 33% bis 59% größeres Potenzial zur Unfallvermeidung hat, als das Ausrüsten des entgegenkommenden Fahrzeuges, welches eine Vermeidung von 11% bis 26% bewirkt. Außerdem wurde festgestellt, dass bei einer Geschwindigkeit des abbiegenden Fahrzeugs von über 40 km/h die Mehrheit der Unfälle nicht durch ein AEB-System vermieden werden kann. Eine Analyse der Relativpositionen zeigte, dass AEB Systeme, welche dem Stand der Technik entsprechen, theoretisch in der Lage sind diese Unfallszenarien zu detektieren.

Hummel et al. (2011) [20] haben eine große Anzahl an Unfällen untersucht. Als Basis dienen Daten der Unfalldatenbank (UDB) der Unfallforschung der Versicherer. Es wurden sieben Unfallkonstellationen betrachtet. Die zwei häufigsten Konstellationen der Studie sind Unfälle mit einem anderen Fahrzeug das kreuzt oder einbiegt sowie Auffahrunfälle. Dabei wurde zwischen dem Notbremsassistent 1 (NBA 1) und dem Notbremsassistent 2 (NBA 2) unterschieden.

NBA 1 ist ein Bremskraftverstärker, welcher im Fall einer fahrerinitiierten Notbremsung die Bremskraft bis zum ABS-Regelbereich verstärkt. Es wurden 136.954 Unfälle betrachtet. Bei rund 60% der Fälle tritt der erste Anstoß an der Fahrzeugfront auf, in welchen in knapp der Hälfte (48,8%) der Fälle eine Bremsung des Fahrers eingeleitet wurde. Bei den Unfällen mit Bremsung des Fahrers wurden für die weitere Analyse nur Unfälle mit einem zur Beantwortung der Frage ausreichenden Informationsgehalt herangezogen. Unter den Annahmen, dass mittels Systemeingriff immer die maximal erreichbare Verzögerung erreicht wird sowie, dass der Unfallgegner weder seine Geschwindigkeit noch seine Trajektorie ändert, kann aus dieser Studie eine Vermeidbarkeit oder Minderung der Kollisionsgeschwindigkeit von 11,4% bei den verbleibenden 52.226 Unfällen abgeleitet werden.

Bei NBA 2 erweitert sich das System um eine autonome Teilbremsung mit 0,6 g, sofern der Fahrer bis TTC 1,6 s nicht reagiert. Die Studie zeigte bei einer Kombination beider Systeme eine Vermeidbarkeit oder Minderung der Kollisionsgeschwindigkeit von 17,8%.

Fildes et al. (2015) [21] haben einen Vergleich verschiedener AEB-Systeme bei niedriger Geschwindigkeit durchgeführt. Es wurden reale Heckkollisionen betrachtet und eine Vermeidbarkeit von 38% festgestellt.

Cicchino (2016) [22] hat den Effekt einer Kollisionswarnung sowie einer Notbremsfunktion für geringe Geschwindigkeiten bezogen auf Heckkollisionen untersucht. In dieser Studie wurde eine Reduktion von 27% der Unfälle durch eine Kollisionswarnung sowie eine Reduktion von 43% der Unfälle durch eine Notbremsfunktion festgestellt.

2.3 Sensorik für die Umfelderkennung

Für eine funktionierende Notbremsfunktion ist eine zuverlässige Umfelderkennung notwendig. Je nach Distanz und Art des zu detektierenden Objekts sind Sensoren dafür besser oder schlechter geeignet. [23] Wichtige Parameter für die Sensoren sind der Field of View (FoV), die Reichweite sowie die Auflösung. Bei einem farberfassenden System ist zusätzlich die Farbempfindlichkeit von Relevanz. [4] Üblicherweise werden verschiedene Sensoren kombiniert. [23]

Im Zuge der Automatisierung von Fahrzeugen steigt die Anzahl der im Fahrzeug verbauten Sensoren zur Umfelderkennung. Abbildung 2-3 zeigt eine mögliche Anordnung für ein autonomes Fahrzeug. Es ist zu erkennen, dass eine große Anzahl an Sensoren notwendig ist, um eine möglichst große Distanz vor dem Fahrzeug erfassen zu können und eine ausreichende Erfassung rund um das Fahrzeug zu gewährleisten. [23]

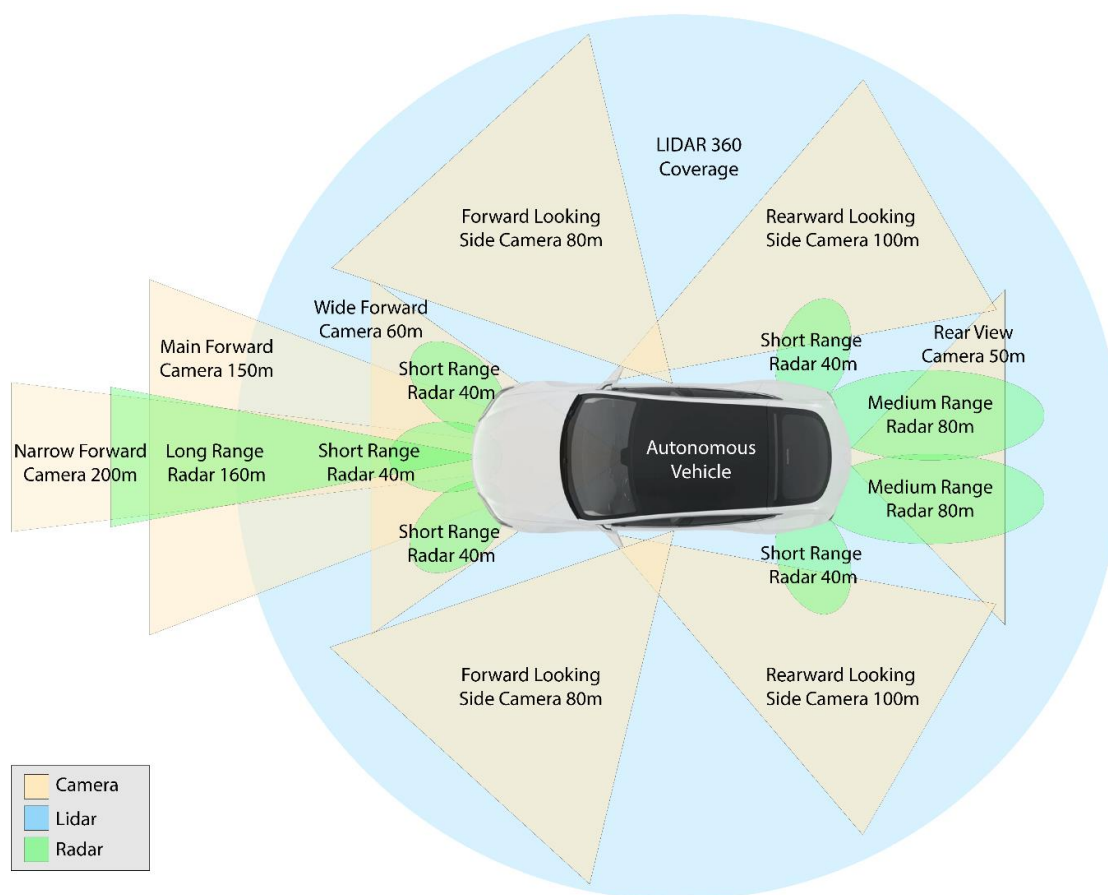


Abbildung 2-3: Mögliche Anordnung der Umfoldsensoren bei einem autonomen Fahrzeug [23]

Wie bereits erwähnt testet der Euro NCAP derzeit die Notbremsfunktion eines Fahrzeugs nach dem AEB-Testprotokoll [17] sowie dem AEB-Testprotokoll für ungeschützte Verkehrsteilnehmer [18]. Bei beiden Tests sind die Dummies für Radarsysteme (24 und 77 GHz), LIDAR-Systeme sowie Kameras ausgelegt [17, 18]. Diese Sensoren sind auch in der Abbildung 2-3 ersichtlich. Der FoV ist in der Abbildung für das Kamerasystem in Gelb, für das LIDAR-System in Blau und für das Radarsystem in Grün eingezeichnet. Diese Sensoren werden in weiterer Folge detailliert beschrieben.

2.3.1 Radar

Radar steht für die Abkürzung von „Radio Detection And Ranging“ und bezeichnet Systeme, welche eine funkgestützte Richtungs- und Abstandsmessung durchführen. Sie arbeiten nach dem Prinzip elektromagnetische Wellen auszusenden und die durch ein Objekt verursachte Reflektion zu detektieren. Radarsysteme nutzen die Zeitdifferenz, welche ein Strahl benötigt, um nach dem Aussenden detektiert zu werden, um die relative Position eines Objekts zu erkennen. Um die Relativgeschwindigkeit zu ermitteln wird der Doppler Effekt genutzt. [23]

Zusätzlich muss das System in der Lage sein die exakte Zuordnung zwischen einem gesendeten und empfangenen Signal durchführen zu können. Daher ist es notwendig die Signale im Frequenz-Zeit-Verlauf zu modulieren. Dies erfolgt durch die Puls-Modulation oder durch die Frequenzmodulation. Bei der Puls-Modulation werden Pulse in der Größenordnung von 10 bis 30 ns gebildet und die Laufzeit τ zwischen Senden und Empfangen gemessen. Über die Laufzeit τ lässt sich bei direkter Reflexion mithilfe der Lichtgeschwindigkeit c der Abstand d ermitteln: [9]

$$d = \frac{\tau * c}{2} \quad \text{Formel 2-1: Ermittlung des Abstands } d \text{ bei der Puls-Modulation [9]}$$

Eine einfachere Methode ist die indirekte Laufzeitmessung über die Frequenzmodulation. Statt den Laufzeiten werden die Frequenzen zwischen Sendesignal und Empfangsecho verglichen. Das Verfahren nennt sich FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave). Die Frequenzen werden linear moduliert ausgesendet und besitzen einen Hub von einigen hundert MHz. Ein empfangenes Signal ist im linear steigenden Bereich von niedriger Frequenz und im fallenden Bereich von hoher Frequenz. Diese Frequenzdifferenz ist ein Maß für den Abstand. Bei bestehender Relativgeschwindigkeit wirkt sich zusätzlich noch der Doppler Effekt auf die empfangene Frequenz aus. [9]

Da Radiostrahlen nicht durch Wetter- und Lichtbedingungen, wie Nacht, Nebel und andere Umgebungsbedingungen, beeinflusst werden sind sie sehr gut zur Verwendung in Fahrzeugen geeignet. [23]

Bei den radarbasierten Systemen wird zwischen Short-, Medium- sowie Long-Range-Radar-Sensoren unterschieden, siehe Abbildung 2-3. Short-Range-Radar-Sensoren arbeiten mit einer Frequenz von 24 GHz, besitzen eine Reichweite von bis zu 50 m und werden hauptsächlich als Sensoren für

Parkassistenten sowie für warnende Funktionen eingesetzt. Medium-Range-Radar-Systeme werden meist für Totwinkel-Assistenten sowie zur Detektion von Seiten- und Heckkollisionen verwendet. Long-Range-Radar-Sensoren arbeiten mit einer Frequenz von 77 GHz und besitzen eine Reichweite von bis zu 250 m. Dieser Sensor tastet den Raum vor dem Fahrzeug in einem Winkelbereich von $\pm 16^\circ$ ab. Radarsysteme werden typischerweise in der Stoßstange oder im Bereich des Kühlergrills verbaut.

[5, 23]

2.3.2 LIDAR

LIDAR ist die Abkürzung für Light Detection and Ranging. Unter diesem Begriff versteht man Systeme, welche Laserstrahlen oder Infrarotstrahlen emittieren und über die Reflektion die Umgebung erfassen. Prinzipiell arbeiten LIDAR-Sensoren nach dem gleichen Prinzip wie Radarsensoren, mit dem Unterschied, dass die Wellenlänge bei LIDAR-Systemen im Bereich von 800-1000 nm liegt und bei Radarsystemen im mm Bereich. Die Strahlung wird moduliert, zum Beispiel als Sinusschwingungen oder Pulse, und danach emittiert. Durch die Weitergabe der Modulationsinformationen an den Empfänger kann dieser die Entfernung zum Objekt mithilfe des empfangenen Signals bestimmen. Die Bestimmung erfolgt analog zu den Radarsensoren über die Lichtgeschwindigkeit sowie über die Laufzeit τ . [9, 23]

Damit das LIDAR in der Lage ist die Umgebung zu erfassen, müssen sich Sender- und Empfängerteil drehen. Das Grundprinzip ist in Abbildung 2-4 ersichtlich. Es werden zwei Konzepte unterschieden, mechanischer LIDAR und Solid State LIDAR. Beim mechanischen LIDAR sind rotierende Linsen verbaut, wodurch sie weniger robust sind. Solide State LIDAR benötigen keine Rotationsteile, da diese Laserstrahlen elektrisch steuern. [23]

Durch die kleinere Wellenlänge geben LIDAR-Sensoren die Umgebung in einer höheren Auflösung als Radarsensoren in Form einer Punktwolke wieder. Jedoch werden Laserstrahlen oder Infrarotstrahlen bei Nebel, schlechten Schichtverhältnissen oder Gischt gedämpft, was sich auf die Messreichweite auswirkt. [9]

LIDAR-Systeme besitzen typischerweise eine Reichweite von 40 bis 100 m bei einer horizontalen Winkelauflösung von $0,2^\circ$ und einer Arbeitsfrequenz von 10 bis 20 Hz. [23]

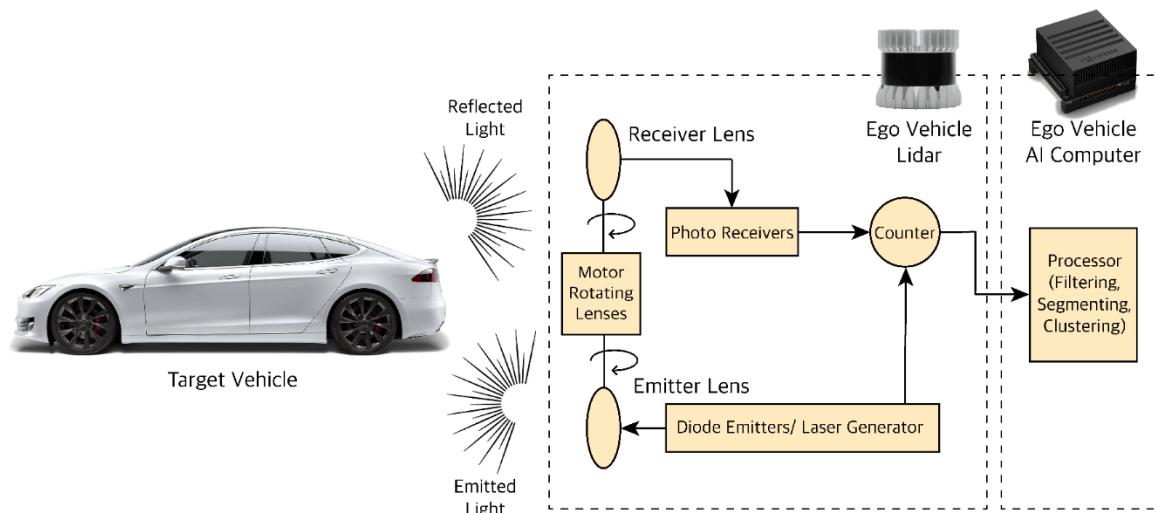


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der Funktionsweise eines LIDAR-Sensors

2.3.3 Kamera

Kameras haben ein sehr breites Anwendungsspektrum bei Fahrzeugen. Für eine Notbremsfunktion ist hauptsächlich die Frontview-Kamera von Relevanz. Diese wird meist im Bereich des Rückspiegels hinter der Windschutzscheibe platziert. Dadurch ist die Kamera durch die Windschutzscheibe geschützt. Außerdem wird der Sichtbereich durch die Scheibenwischer überstrichen. [4]

Eine große Herausforderung für kamerabasierte Systeme stellen die ungleichen Beleuchtungsverhältnisse dar. Beispielsweise sind tagsüber verschiedene Einstellungen für die Beleuchtung sowie Kontrastdarstellung notwendig. In der Nacht erweisen sich die Bedingungen als noch schwieriger. [24]

Die Detektion eines anderen Fahrzeugs erfolgt durch einen Algorithmus der zunächst alle Objekte, welche als kritische Objekte relevant sein könnten, erkennt. Dieser Schritt ist im linken Bild von Abbildung 2-5 ersichtlich. Dabei sind die möglichen kritischen Objekte als Rechtecke markiert. Im nächsten Schritt muss das System ermitteln, welche Fahrzeuge potenziell innerhalb der gefahrenen Trajektorie des Fahrzeugs liegen könnten. Es bleiben die für eine mögliche Kollision relevanten Objekte übrig. In der rechten Darstellung in Abbildung 2-5 sind die in diesem Szenario vom System identifizierten relevanten Objekte markiert dargestellt. [24]



Abbildung 2-5: Mögliche Objekte (links) und kritische Objekte (rechts) [24]

Abschließend muss das System eine Abschätzung der Time To Collision (TTC) vornehmen, was auf zwei Arten erfolgen kann. Der erste Ansatz basiert darauf, dass sich die Geschwindigkeiten und somit die Relativgeschwindigkeit beider Fahrzeuge bis zur theoretischen Kollision nicht ändern. Es wird die Annahme getroffen, dass die Beschleunigung bis zur theoretischen Kollision null bleibt. Diese vereinfachte Betrachtungsform wird auch als „momentary TTC“ bezeichnet. Der andere Ansatz beruht darauf, dass sich die Beschleunigungen bis zum Stillstand nicht ändern.

Die Änderung der Distanz beider Fahrzeuge zueinander kann durch verschiedene Vorgehensweisen erfolgen. Eine Variante ist die Änderung der Skalierung des Objekts heranzuziehen. Dabei werden die einzelnen Frames, also die zeitlich folgenden Bilder der Kamera, miteinander verglichen. Erscheint das Objekt sehr groß, hat das Objekt die Kamera erreicht. Entfernt sich das Objekt wieder, erscheint es sehr klein. Anhand dieser Logik erfolgt die Berechnung des TTC. [24]

Neben Monokamerasystemen kommen immer häufiger Stereokamerasysteme zur Anwendung. Bei Stereokamerasystemen sind zwei Kameras verbaut, dadurch ist eine dreidimensionale Umwelterfassung möglich. Im Vergleich zu Monokamerasystemen ist ein höherer Rechenaufwand notwendig. Außerdem muss auf die Lage und Orientierung der Kameras zueinander geachtet werden. [4]

3 METHODE

Die Methode dieser Arbeit wird in die drei Schritte Unfallrekonstruktion, Vorwärtssimulation und Bewertung eingeteilt, siehe Abbildung 3-1. Für den ersten Methodenschritt dienen Unfalldaten der IGLAD-Datenbank als Datenquelle. Die Unfalldaten werden so aufbereitet, dass der Unfall mit der Unfallrekonstruktionssoftware PC-Crash rekonstruiert werden kann. Anschließend werden die Daten der Unfallrekonstruktionen herangezogen und die Fahrzeuge mittels dem Tool X- RATE (Stand Oktober 2019) mit oder ohne Eingriffsstrategie versehen und simuliert.

Im Zuge jeder Unfallrekonstruktion und Vorwärtssimulation wird eine Plausibilitätsprüfung durchgeführt. In Abbildung 3-1 stellen die Rückwärtspfeile eine mögliche Iterationsschleife dar sofern ein Plausibilitätskriterium nicht erfüllt wird.

Abschließend werden die Simulationsergebnisse mittels Matlab R2018b sowie Excel 2016 aufbereitet und anschließend ausgewertet. Dazu werden neben Kenngrößen der Unfallrekonstruktion wie der Kollisionsgeschwindigkeit auch die Kollisionskonfiguration bewertet.

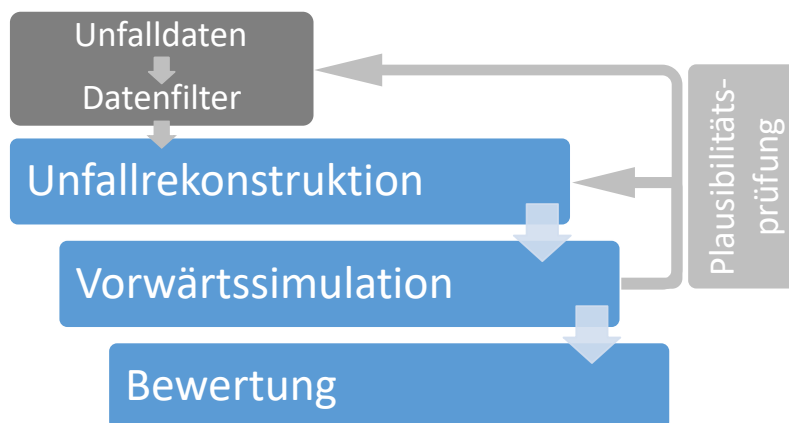


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der in der Arbeit verwendeten Methode

3.1 Datenfilter

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise zur Generierung der Stichprobe für die nachfolgende Unfallrekonstruktion und Vorwärtssimulation beschrieben.

3.1.1 IGLAD - Datenbank

Die Unfalldaten werden aus der IGLAD Datenbank herangezogen. IGLAD steht für “Initiative for the Global Harmonization of Accident Data” und wurde von der Daimler AG, der European Automobile Manufacturers Association (ACEA) und anderen Forschungseinrichtungen als Arbeitsgruppe bei der FIA Mobility Group im Oktober 2010 gegründet. [25]

Obwohl viele Länder nationale Unfallstatistiken über Schwerverletzte und Unfälle mit Todesfolgen führen fehlen oft detailliertere Informationen über den Unfallhergang. Eine detaillierte Beschreibung von Unfällen erfolgt daher meist in eigenen Datenbanken zur Tiefenanalyse von Verkehrsunfällen. Ein Beispiel für eine nationale Datenbank zur Tiefenanalyse von Verkehrsunfällen ist die CEDATU (Central Database for In-Depth Accident Study), welche in Österreich durch das Institut für Fahrzeugsicherheit der Technischen Universität Graz betrieben wird. [26] Bei diesen Datenbanken besteht jedoch das Problem, dass unterschiedliche Erhebungsprotokolle verwendet werden und diese nicht vollständig kompatibel sind.

Ziel der IGLAD ist daher eine einheitliche Unfalldatenbank mit spezifischen Datenfeldern zu definieren. Dabei werden folgende Rahmenbedingungen gesetzt: [25]

- Aufbau einer internationalen und einheitlichen Unfalldatenbank zur Tiefenanalyse
- Sammlung von detaillierten Informationen über den Unfallhergang einzelner Verkehrsunfälle
- Harmonisiertes Schema zur Aufbereitung der Daten
- Keine neue Datenbank im engeren Sinne, sondern es werden bestehenden Ressourcen genützt

Die IGLAD-Datenbank umfasst mit Stand 2019 5.800 Fälle, welche im Zeitraum von 2007 bis 2017 erfasst wurden. Die Daten stammen aus 13 Ländern wobei der Großteil aus europäischen Datenbanken bezogen wurde. Ein Überblick über die unterschiedlichen Datenbanken sowie Länder ist in Abbildung 3-2 ersichtlich. [27]

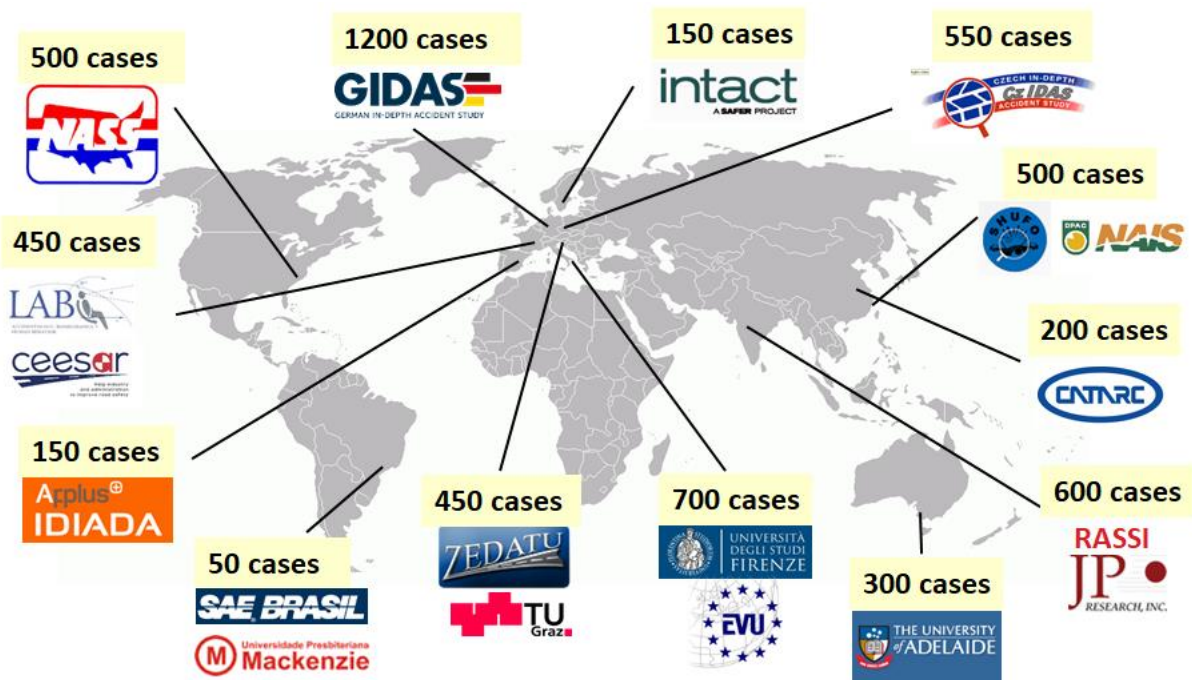


Abbildung 3-2: Verteilung der IGLAD-Fälle nach Herkunftsland [27]

3.1.2 Filterkriterien

Aufgrund der großen Anzahl an Parametern ist es möglich die IGLAD Unfalldaten nach verschiedenen Kriterien zu filtern. Die Daten wurden in fünf Schritten gefiltert:

- **Filter 1:** Beschränkung auf urbane europäische Unfälle
- **Filter 2:** Nur Unfälle mit mindestens einem Personenkraftwagen und maximal zwei Unfallbeteiligten
- **Filter 3:** Ungeschützte Verkehrsteilnehmer (Fußgänger, Radfahrer) sind ausgeschlossen
- **Filter 4:** Nur Unfälle, bei denen der Unfallverursacher (Beteiligter A) oder nicht verursachender Unfallbeteiligter (Beteiligter B) einen Personenkraftwagen fährt. Sofern die Fahrzeugart bei einem der beiden Unfallbeteiligten unbekannt ist werden diese Fälle ausgeschlossen.
- **Filter 5:** Zusätzliche Filterkriterien bezüglich des autonomen Fahrens auf Grund von unfallbeitragenden Faktoren mit der Unterteilung in:
 - Keine Missachtung der Verkehrsregeln (Safe Drive)
 - Angemessenes Fahren aufgrund von einschränkenden Fahrzuständen wie zum Beispiel wetterbedingte Sichtverhältnisse (Cautionary boundaries)

Eine detaillierte Auflistung aller Kriterien aus Filter 5 ist als Filterkriterien-Katalog im Anhang C ersichtlich. Ein Auszug ist in Tabelle 3-1 beschrieben.

Tabelle 3-1: Auszug aus den Filterkriterien-Katalog

Defintion		Assigned value
Safe drive defined as not violate any traffic rules		1
Cautionary boundaries adapt driving after driving condition, e.g. visibility, weather		2
Further analysis required e.g. simulation of crash scenario		3
#	Accidental cause	Filter value
CATEGORY: FITNESS TO DRIVE		
1	Alcohol	1
2	Other stimulation substances, eg.g. drugs, medication	1
3	Drowsiness	2
4	Other physical or psychical deficiencies	2
CATEGORY: WRONG BEHAVIOR OF DRIVER, ROAD USAGE		
10	Use of wrong lane or illegal road usage	1
11	Violation against lane discipline, e.g. driving on outside lane	1
CATEGORY: SPEED		
12	Speeding (exceeding speed limit)	1
13	Excessive speed for conditions (not exceeding speed limit)	3
CATEGORY: DISTANCE		
14	Lack of safety distance / safety distance	3
15	Heavy braking without obvious reasons	3

3.1.3 Stichprobengröße der Unfälle

Aufgrund der oben genannten Filterkriterien reduziert sich die Anzahl der Unfälle von 5.800 auf 295 und bilden jene Unfälle, welche auf Grund der Analyse von unfallbeitragenden Faktoren auch durch ein autonomes Fahrzeug ohne weitere Analyse nicht verhindert werden könnten. Diese Anzahl stellt die Stichprobengröße für diese Arbeit dar.

Abbildung 3-3 stellt die Anzahl der Unfälle nach Fahrzeugtyp dar. 93 Fälle (32%) in der Stichprobe sind Unfälle mit einspurigen Fahrzeugen. 28 Fälle beziehungsweise 9% sind Unfälle, bei denen einer der beiden unfallbeteiligten Fahrzeuge kein Personenkraftwagen, sondern ein Lastkraftwagen (Lkw), Bus oder eine Straßenbahn ist. Diese werden im Zuge der Arbeit sowohl rekonstruiert als auch simuliert, jedoch nicht näher ausgewertet, da sie nicht den Filterkriterien entsprechen. Als Basis für die spätere Auswertung verbleiben dadurch 174 Fälle.

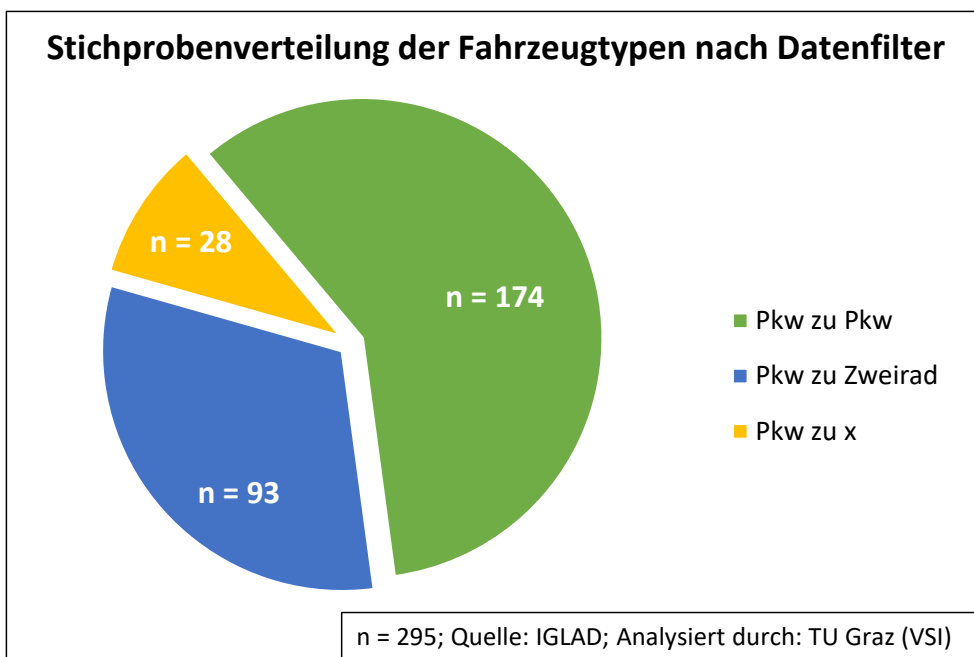


Abbildung 3-3: Stichprobenverteilung der Fahrzeugtypen nach Datenfilter

Werden die Unfälle nach dem Herkunftsland unterteilt, entfällt knapp die Hälfte der Fälle auf Deutschland. Die Ausgangslage setzt sich folgendermaßen zusammen: 49% der Fälle stammen aus Deutschland, 15% aus Frankreich, 13% aus Italien, 11% aus Tschechien, 7% aus Schweden und 5% aus Österreich. Die jeweilige Anzahl an Unfällen ist in Abbildung 3-4 ersichtlich.

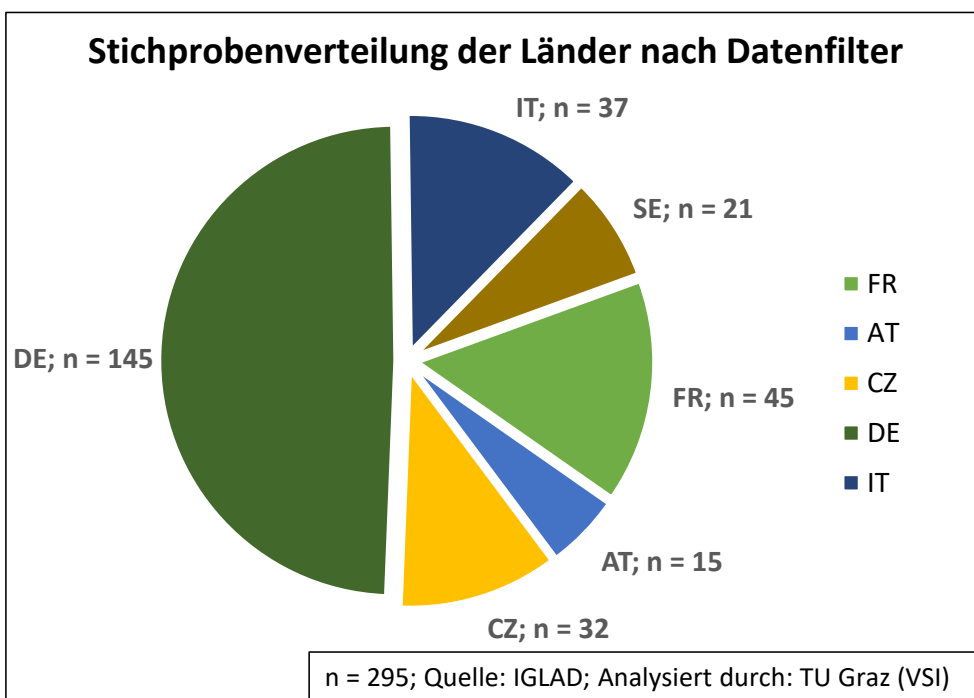


Abbildung 3-4: Stichprobenverteilung der Länder nach Datenfilter

Methode

Für die Klassifikation der Konfliktsituationen wird ein Unfalltypenkatalog, welcher vom Haftpflicht, Unfall und Kraftfahrzeug - Verband (HUK – Verband) im Jahr 1977 entwickelt wurde, verwendet. Die Unfalltypen werden über drei Stellen beschrieben. Die erste Stelle beschreibt die Hauptkategorie, die zweite Stelle die Unterkategorie und die dritte Stelle den detaillierten Unfalltyp. In der Arbeit werden nur die ersten zwei Stellen betrachtet. Beispielsweise entspricht der Unfalltyp 61 einem Unfall der Hauptkategorie 6, also einem Unfall im Längsverkehr, und wird durch die zweite Ziffer in die Unterkategorie 1 als Unfall im Längsverkehr bei Stau detaillierter beschrieben. Eine genaue Auflistung der Unfalltypen ist als Unfalltypen-Katalog im Anhang D angehängt. Die Unterteilung der Hauptkategorie lautet wie folgt: [25]

- **Unfalltyp 1:** Fahrrunfall
- **Unfalltyp 2:** Abbiege-Unfall
- **Unfalltyp 3:** Einbiegen/Kreuzen-Unfall
- **Unfalltyp 4:** Überschreiten-Unfall
- **Unfalltyp 5:** Unfall durch ruhenden Verkehr
- **Unfalltyp 6:** Unfall im Längsverkehr
- **Unfalltyp 7:** Sonstiger Unfall

Werden die Unfälle nach der Unterkategorie betrachtet, siehe Abbildung 3-5, wird ersichtlich, dass Unfälle der Hauptkategorie 2 (20 und 21), 3 (30 und 32) und 6 (60,61,62 und 68) am häufigsten auftreten. Bei den Unterkategorien tritt der Typ 21, welcher einem Abbiegeunfall mit Gegenverkehr entspricht, mit 47 Fällen (16%) am häufigsten auf. Am zweithäufigsten sind Einbiegeunfälle bei denen der Unfallgegner von links kommt (Typ 30) mit 43 Fällen (15%). Die Bedeutung und Bezeichnung der Unfalltypen ist in Abbildung 3-5 unter der jeweiligen Säule ersichtlich. Die letzte Säule „other“ entspricht der Summe der übrigen nicht einzeln angeführten Unfälle.

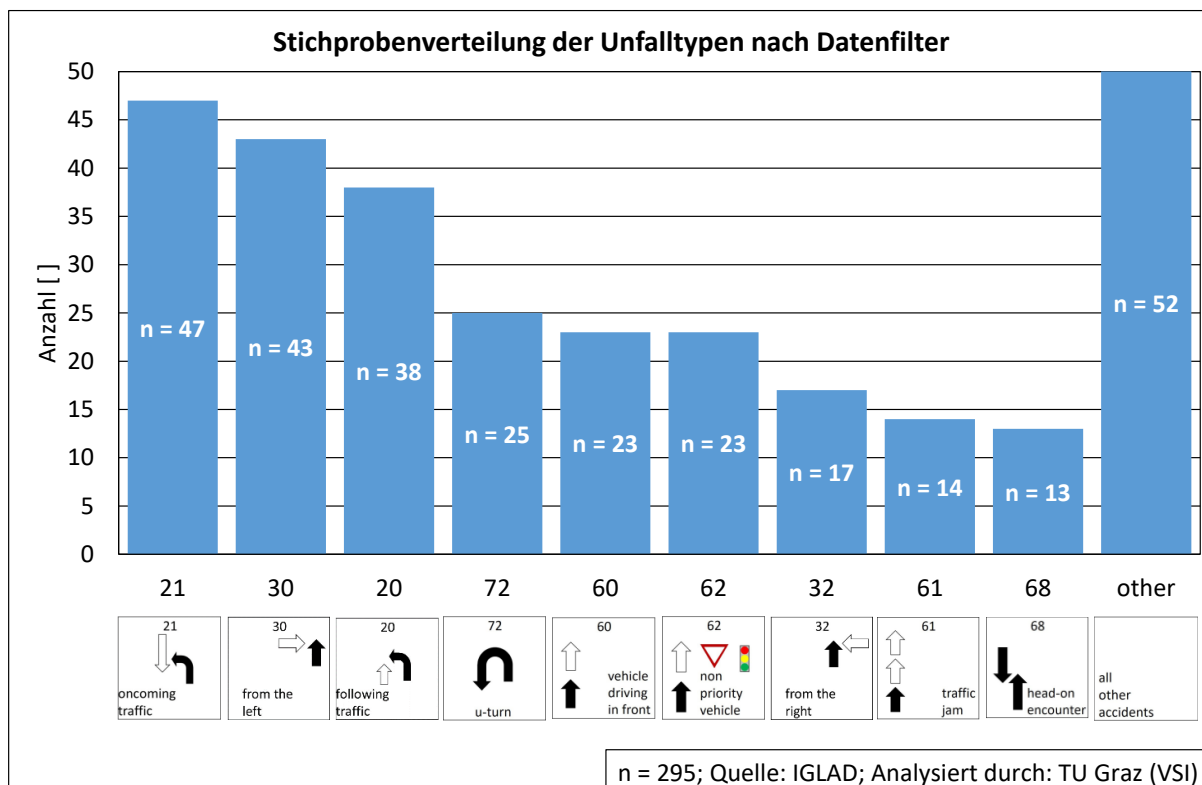


Abbildung 3-5: Stichprobenverteilung der Unfalltypen nach Datenfilter

3.1.4 Unfalldaten

Die IGLAD-Datenbank wird in die vier Hauptkategorien Unfall, Beteiligter, Insassen und Sicherheitssysteme eingeteilt. Jede dieser Hauptkategorien enthält eine große Anzahl an Parametern. Diese Parameter sind im „IGLAD Codebook“ aufgelistet und detailliert beschrieben. [25]

Im Folgenden werden nur die für die Unfallrekonstruktion verwendeten Parameter der Kategorien Unfall und Beteiligter betrachtet. Die Hauptkategorien Insassen und Sicherheitssysteme sind für diese Arbeit nicht relevant. Eine detaillierte Beschreibung der in der Arbeit verwendeten Parameter ist im Anhang E zusammengefasst. Tabelle 3-2 beinhaltet die Hauptkategorien mit den dazugehörigen Parametern und stellt diese anhand eines Beispiels dar.

Zusätzlich zu diesen Parametern sind den Unfällen auch Unfallskizzen beigelegt. Die Unfallskizzen variieren je nach Jahr der Datenfreigabe sowie Herkunftsland der Daten des Unfalls. Dies betrifft die Genauigkeit sowie die Anzahl an Informationen. Die Qualität der Skizzen reicht von einer verzerrten Handzeichnung bis zu detaillierten und maßstabsgetreuen Skizzen. Die Unfallskizzen enthalten unter anderem Informationen über die Straßenführung, die Endposition beider Unfallbeteiligter, die Kollisionskonfiguration und Verkehrszeichen.

Tabelle 3-2: Parameter der IGLAD Datenbank mit dazugehörigen Hauptkategorien [25]

IGLAD Parameter nach Kategorien						
Kategorie Unfall						
Accident	ACCTYPE	ACCTYPE	COUNTRY	GPSLAT	GPSLONG	ROADCOND
[yy][XX][0000]	30	Type 3	DE	52.426389	9.45	dry
Kategorie Beteiligter - Unfallbeteiligter 1						
PARTNR	PARTTYPE	VEHMAKE	MODEL	REGYEAR	ENGPOWER	VEHMASS
[yy][XX][0000]-1	passenger car	xxx	xxx	2006	145	1665
	CDC1DIRE	CDC1AREA	CDC1LONG	DEFANG1	DECEL1	DECDIST1
	12	Front	L1	-5	1	92
	INISPEED1	COLSPEED1	DELTAV1	EES1		
	33	33	9	14		
Kategorie Beteiligter - Unfallbeteiligter 2						
PARTNR	PARTTYPE	VEHMAKE	MODEL	REGYEAR	ENGPOWER	VEHMASS
[yy][XX][0000]-2	passenger car	xxx	xxx	1998	99999	99999
	CDC2DIRE	CDC2AREA	CDC2LONG	DEFANG2	DECEL2	DECDIST2
	3	Side	F0	35	27	149
	INISPEED2	COLSPEED2	DELTAV2	EES2		
	36	15	13	13		

Neben den Unfallparametern und der Unfallskizze ist auch eine kurze Beschreibung des Unfallhergangs enthalten. Die Qualität und der Detailgrad der Beschreibung variieren ebenso wie bei den Unfallskizzen stark. Für den in Tabelle 3-2 betrachteten Unfall lautet die Beschreibung sinngemäß:

Der Unfallverursacher will in eine Kreuzung einbiegen und missachtet den Vorrang eines von links kommenden Fahrzeugs. Beide Fahrzeuge kollidieren innerhalb des Kreuzungsbereichs.

Neben den IGLAD-Daten werden zusätzlich Informationen der DSD-Datenbank von PC-Crash sowie von Google-Maps genutzt. Google Maps bietet neben Kartenmaterial auch Satellitenaufnahmen, 3D-View sowie Street View zum Betrachten von Straßen. Diese Informationen werden im Zuge der Arbeit genutzt um Details über die Unfallstelle zu erhalten. Die Darstellung von Google kann minimal verzerrt sein, sodass die realen Längenverhältnisse nicht korrekt dargestellt werden. Da viele Unfälle der IGLAD-Datenbank Unfallskizzen mit nicht exakter und/oder verzerrter Abbildung der Unfallstelle enthalten, bietet das Google-Kartenmaterial meist eine exaktere und detailliertere Darstellung der Unfallstelle. Daher werden diese Informationen als Ergänzung zur eigentlichen Unfallskizze herangezogen und die Informationen beider Quellen kombiniert. Die Ermittlung der genauen Unfallstelle erfolgt über die GPS-Koordinaten und der Unfallskizze.

Die IGLAD-Datenbank liefert Informationen über den Hersteller, das Modell sowie das Baujahr des Fahrzeugs, jedoch keine Informationen über dessen Hauptabmessungen, Federsteifigkeiten und andere Fahrzeugparameter. Diese werden im Zuge der Rekonstruktion aus der DSD Datenbank, welche im Lieferumfang der Software PC-Crash enthalten ist, geladen. [28]

3.2 Unfallrekonstruktion

In diesem Abschnitt wird zunächst das Fahrmodellsimulationmodell von PC-Crash betrachtet und anschließend die Vorgehensweise bei der Unfallrekonstruktion erklärt. Die Unfallrekonstruktion beginnt mit der Nachmodellierung der Unfallstelle und endet mit der abgeschlossenen Vorwärts- und Rückwärtssimulation. Die Unfallrekonstruktion erfolgt mit Hilfe der im Kapitel 3.1.4 erläuterten Unfallparameter unter Verwendung der Software PC-Crash mit der Version 11.0.0.32a.

Das Simulationsmodell in PC-Crash unterscheidet zwischen der Vorwärts- und Rückwärtssimulation. Die Vorwärtssimulation betrachtet alle Fahrbewegungen im positiven Zeitschritt. Umgekehrt beschreibt die Rückwärtssimulation alle negativen Zeitschritte. Die Fahrzeugpositionen zum Zeitpunkt null werden manuell durch den Benutzer festgelegt. In dieser Arbeit entspricht der Zeitpunkt null immer jenem Zeitpunkt in dem die beiden Fahrzeuge im Bereich des Kollisionspunkts (POI = „Point of Impact“) erstmalig aneinanderstoßen. Zur Durchführung der Unfallsimulation enthält die Software ein Kinematikmodell und ein Kinetikmodell. [28]

Beim Kinematikmodell werden die dynamischen Kräfte des Fahrzeuges nicht in der Berechnung berücksichtigt. Die Beschleunigung errechnet sich wie folgt: [28]

$$a = g * \frac{\sum F_{x'ii}}{\sum F_{z'ii}} \quad \text{Formel 3-1: Ermittlung der Beschleunigung [28]}$$

Es gilt folgende Zusammenhang zwischen den beiden Kräften: [28]

$$F_{x'ii} \leq \mu_i * F_{z'ii} \quad \text{Formel 3-2: Zusammenhang beider Reifenkräfte [28]}$$

Dabei entspricht g der Erdbeschleunigung, $F_{z'ii}$ der normalen Traglast des jeweiligen Rades, $F_{x'ii}$ der Brems- oder Beschleunigungskraft des jeweiligen Rades und μ_i dem Reibungskoeffizienten des jeweiligen Rades. Beim Kinematikmodell wird die mittlere Verzögerung a mit der vorgegebenen Zeitschrittweite Δt multipliziert und anschließend mit der Ausgangsgeschwindigkeit v_0 addiert um die aktuelle Geschwindigkeit v zu ermitteln:

$$v = v_0 + a * \Delta t \quad \text{Formel 3-3: Ermittlung der Geschwindigkeit [28]}$$

Das Fahrzeug folgt im Falle einer Kurvenfahrt der Rekonstruktionsfolgespur und das Simulationsmodell berechnet den Kurvenradius aufgrund geometrischer Bedingungen. Die Reibung wirkt sich daher nur auf die längslaufende Reifenkraft aus. [28]

Im Gegensatz zum Kinematikmodell berücksichtigt das kinetische Modell alle dynamischen Fahrzeugkräfte. Die Ermittlung der Längs- und Querreifenkräfte erfolgt anhand des Schräglaufwinkels sowie der Beschleunigungs- und Bremskräfte. Die Radkräfte überschreiten die örtlich verfügbare Reibung nicht: [28]

$$\sqrt{F_{y''}^2 + F_{x''}^2} \leq \mu * F_{z''}$$

Formel 3-4: Zusammenhang der Reifenkräfte [28]

$F_{y''}$ entspricht der Reifenquerkraft, $F_{x''}$ der Reifenlängskraft, $F_{z''}$ der normalen Radlast und μ der lokalen Reibung.

Bei der Vorwärtssimulation wird in dieser Arbeit immer kinetisch simuliert. Bei der Rückwärtssimulation wird je nach Unfallkonstellation und der gefahrenen Trajektorie des Fahrzeugs in der Vorkollisionsphase kinematisch oder kinetisch gerechnet. Die kinetische Rückwärtsrechnung ist im Gegensatz zur kinematischen Rückwärtsrechnung nicht immer möglich.

Die kinetische Rückwärtssimulation funktioniert nur wenn alle Räder ganz blockieren oder wenn keines der Räder des Fahrzeugs gleitet. Sofern keines der Räder gleitet wird über einen Prädiktor-Korrektor Algorithmus gerechnet, wobei PC-Crash keine Garantie über die Richtigkeit der Ergebnisse gibt. Ein Grund dafür liegt in der Nichtlinearität numerischer Gleichungen. Dadurch sind mehrere Lösungen möglich, welche dieselben Grenz- und Ausgangsbedingungen erfüllen. Ein weiterer Grund liegt darin, dass minimale Veränderungen des seitlichen Schräglaufwinkels eine große Auswirkung auf die Reifenkräfte zur Folge haben und somit das Modell sehr sensibel machen. [28]

Im Zuge der Arbeit wird mit einem linearen Reifenmodell gerechnet da eine kinetische Rückwärtsrechnung in der Praxis nur mit diesem Reifenmodell möglich ist. Das lineare Reifenmodell basiert auf der Annahme, dass die Seitenführungskräfte mit steigendem Schräglaufwinkel linear ansteigen. [28]

3.2.1 Nachmodellierung der Unfallstelle

Der erste Schritt der Rekonstruktion ist die Nachmodellierung der Unfallstelle. Wie bereits im Kapitel 3.1.4 beschrieben liefert die IGLAD-Datenbank Unfallskizzen mit unterschiedlicher Genauigkeit und unterschiedlichem Informationsgehalt. Um diese beiden Faktoren auszugleichen werden zusätzlich Informationen von Google Maps herangezogen. Zusätzlich zur besseren Qualität kann beim Google Maps Bildmaterial ein größerer Bereich eingesehen werden wodurch eine exaktere Nachbildung der Vorkollisionsphase möglich ist, siehe Abbildung 3-6. Sofern bei einem Unfall die Qualität der Unfallskizze nicht ausreichend ist und keine GPS-Koordinaten in der Datenbank hinterlegt sind, wird dieser Fall nicht rekonstruiert und in der Arbeit nicht näher betrachtet. Nur wenn beide Informationen vorhanden sind, wird die Unfallskizze mit der Karte von Google Maps überlagert, sonst wird nur die Unfallskizze genutzt. Im Falle einer Abweichung wird die nach dem verfügbaren Datenstand plausiblere Information herangezogen.

Die Neigung der Fahrbahn bzw. der Umgebung wird in dieser Arbeit vernachlässigt und bei allen Unfällen eine ebene Fahrbahn und Umgebung angenommen.



Abbildung 3-6: Kombination beider verfügbaren Bildmaterialien der Unfallstelle [29]

Als nächstes folgt die Rekonstruktionsfolgespur, siehe Abbildung 3-7. Die Rekonstruktionsfolgespur wird verwendet, um die Fahrzeugspur sowohl in der Vorkollisionsphase als auch in der Unfallfolgephase abzubilden. Bei der Unfallfolgephase wird neben der Rekonstruktionsfolgespur auch eine weitere Möglichkeit angewendet um die Fahrzeugspur zu definieren, näheres dazu in Kapitel 3.2.4.

Der nächste Schritt besteht darin, aus den Informationen, welche über die Unfallstelle, sowie über die Umgebung verfügbar sind, eine Unfallskizze nach der PCM (Pre-Crash-Matrix) -Format-Spezifikation v5.0 zu erstellen. Die PCM-Format-Spezifikation ist eine von der Verkehrsunfallforschung der Technischen Universität Dresden entwickelte Vorgehensweise, bei der jede Linie innerhalb einer Unfallskizze einer gewissen Ebene zugewiesen wird. Jede Ebene besitzt spezielle Eigenschaften: [30]

- Eine einmalige spezifische Nummer
- Eine Beschreibung der Ebene
- Angabe über die Linienlänge und Breite
- Eine Angabe darüber, ob eine Linie als durchgehend oder unterbrochen dargestellt wird und mit welchem Abstand die Linie unterbrochen ist
- Farbe der Linie

Methode

Für die Ebenen 621 und 622 sowie 801 und 802 werden abweichende Beschreibungen für diese Arbeit definiert. Diese Ebenen beschreiben die Spuren der beteiligten Fahrzeuge und sind wie folgt festgelegt:

- **Unfallfolgespur (Accident course) = 801 und 802:** Folgespur, welcher der Beteiligte aufgrund seiner Reaktion beim Unfall folgen möchte. Diese ist bis zum Zeitpunkt $t = 0$ s ident mit der Rekonstruktionsfolgespur (Reconstruction course). Die Unfallfolgespur, welcher der Beteiligte nach dem Zeitpunkt $t = 0$ s folgt, ist aus der Unfallkonstellation zu entnehmen.
- **Wunschfolgespur (Intendend course) = 621 und 622:** Folgespur, die der Beteiligte ohne Einfluss durch den Unfallgegner gewählt hätte, beziehungsweise die Spur, welche frei von jeglicher Reaktion auf den Unfallgegner gewählt worden wäre.

Sofern der Beteiligte die Gefahr bzw. den Unfallgegner nicht wahrnimmt oder aus anderen Gründen kein Lenkmanöver einleitet, entspricht die Wunschfolgespur der Unfallfolgespur.

Abbildung 3-7 beinhaltet eine Unfallskizze nach der PCM-Spezifikation. Beispielsweise besitzt die Unfallfolgespur des ersten Unfallbeteiligten die Nummer 801 und wird durch eine durchgehende rote Linie beschrieben.

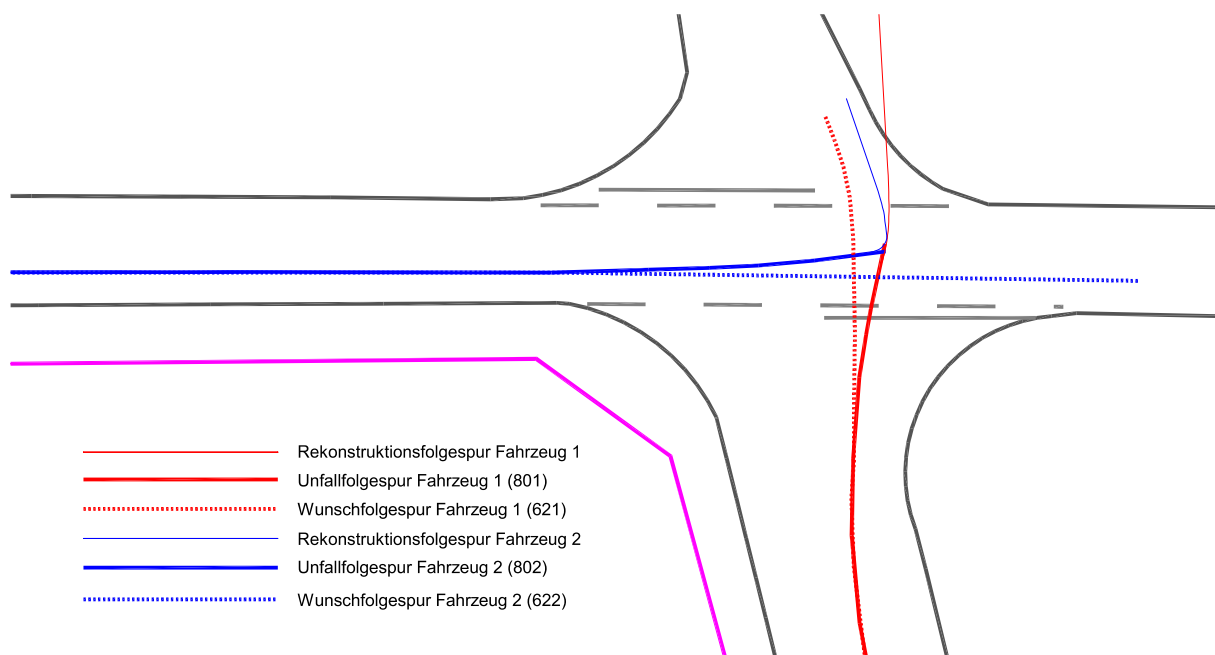


Abbildung 3-7: Unfallskizze nach PCM-Spezifikation v5.0

3.2.2 Positionieren der Fahrzeuge

Nachdem die Unfallstelle nachmodelliert wurde, werden im nächsten Schritt die Fahrzeuge positioniert. Dazu werden Fahrzeuge entsprechend den IGLAD-Parametern aus der PC-Crash Fahrzeugdatenbank geladen. Nach dem Laden des Fahrzeugs wird die Masse mit dem Wert der IGLAD-Datenbank abgeglichen und angepasst. Die Fahrzeuge werden mithilfe der horizontalen Lage des Unfallschadens (CDC-LONG), des Hauptdeformationsbereichs (CDC-AREA) und der Unfallskizze der IGLAD-Datenbank in die jeweilige Kollisionsposition platziert, siehe Abbildung 3-8.

Bei der kinematischen Rückwärtssimulation muss das Fahrzeug exakt auf die Rekonstruktionsfolgespur ausgerichtet werden, da es sonst zu einem Sprung der Position des Fahrzeugs beim Zeitpunkt null kommt. Beim Sprung wandert der Schwerpunkt zur Rekonstruktionsfolgespur. Die Ursache dafür liegt darin, dass der Schwerpunkt des Fahrzeugs bei der kinematischen Rückwärtssimulation als Referenzpunkt für die Fahrzeugposition genutzt wird und der Schwerpunkt entlang der Rekonstruktionsfolgespur rückwärtsgerechnet wird. Erfolgt die Rückwärtssimulation kinetisch ist dieser Sprung nicht gegeben.

3.2.3 Setzen des Stoßpunkts sowie der Berührebene

Im nächsten Schritt wird der Stoßpunkt sowie die Berührebene durch das Stoß-Einlauf-Impuls-Fenster festgelegt. Die Vorgehensweise wird in Abbildung 3-8 veranschaulicht. Als Erstes werden die Kollisionsgeschwindigkeiten der beiden Fahrzeuge gesetzt. Anschließend wird der Stoßpunkt manuell in die Fläche gelegt, bei dem sich die beiden Fahrzeuge überlappen. Dieser Bereich wird in Abbildung 3-8 grün umrandet dargestellt, der Stoßpunkt wird rot dargestellt. Der blaue Richtungspfeil stellt den Stoßkraftvektor dar. Die beiden violetten Linien stellen den Reibungskegel dar und geben den Bereich der Stoßkraft an, bei dem keine Abgleitkollision stattfindet. Die Lage des Reibungskegels ändert sich mit der Drehung der Berührebene, welche als schwarze Linie dargestellt ist. Je nach Drehung der Berührebene kann also eine Abgleitkollision nachgebildet werden. [28] Der Restitutionskoeffizient k sowie der Reibungskoeffizient in der Kontaktzone μ werden nicht verändert.

Das Setzen des Stoßpunktes und der Berührebene beeinflusst das Δv , den EES, die Differenz der Ein- und Auslaufrichtung und die Endlagen beider Fahrzeuge sowie die Richtung des Stoßkraftvektors. Aufgrund der großen Anzahl an Parametern und der Komplexität der Unfallrekonstruktion ist es nicht möglich den Unfall so zu rekonstruieren, dass alle Unfallparameter exakt übereinstimmen. In dieser Arbeit wird daher die nach dem verfügbaren Datenstand plausibelste Stoßkonfiguration gewählt. Tabelle 3-3 stellt den Zusammenhang zwischen den Größen des Stoß-Einlauf-Impuls-Fensters und den IGLAD-Parametern dar.

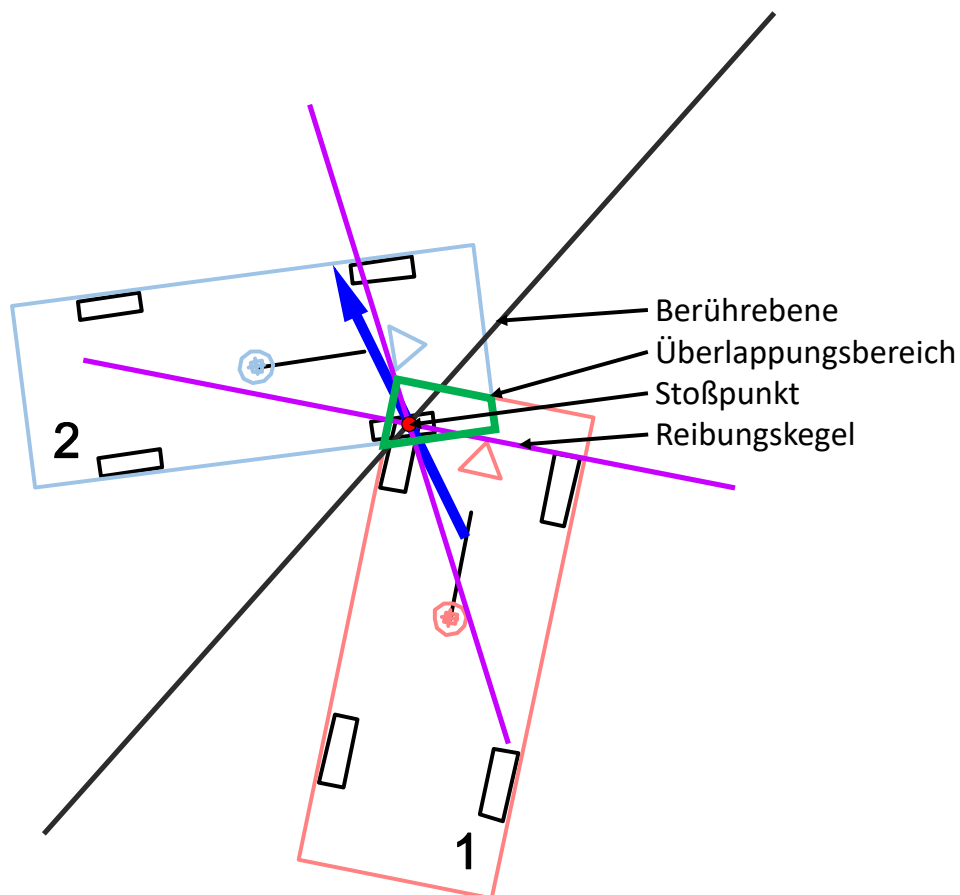


Abbildung 3-8: Positionierte Fahrzeuge mit Rekonstruktionsfolgespur, Stoßpunkt und Berührebene

Tabelle 3-3: Parameter zur Beschreibung des Stoßvorgangs

Parameter zur Beschreibung des Stoßvorgangs	
Stoß-Einlauf-Impuls-Fenster	Festgelegter Wert
Geschwindigkeit [km/h]	COLSPEED
Wirkungslinie der Stoßkraft	CDC-DIRE
Reibung μ	0,6
Restitutionskoeffizient k	0,1
Delta-v [km/h]	Primary collision - delta-v (DELTAV)
EES [km/h]	Primary collision - EES (EES)
Differenz der Richtung [°] aus Ein- und Auslauf	Primary collision - delta angle (DEFANG)

3.2.4 Festlegen der Sequenzen

Im letzten Schritt vor der Simulation werden die Fahrsequenzen festgelegt. Je nach Verhalten in der Vorkollisionsphase wird bei den Sequenzen der Bereich vor dem Zeitschritt null und nach dem Zeitschritt null unterschieden. Um die Sequenztafel mit den Parametern der IGLAD-Datenbank zu füllen, wird die Kinematik-Toolbar genutzt. Die Reaktionszeit wird mit 0,8 s festgelegt. [31] Für die Gesamtzeit der Vorkollisionsphase werden 8 s angenommen. Die Ausgangsgeschwindigkeit, die Verzögerung beziehungsweise Beschleunigung und die Kollisionsgeschwindigkeit werden nach den IGLAD-Parametern gesetzt, siehe Tabelle 3-4.

Tabelle 3-4: Parameter für die Weg-Zeit Berechnung der Unfalleinleitungsphase

Parameter für die Weg-Zeit Berechnung der Unfalleinleitungsphase	
Toolbar	Festgelegter Wert
Ausgangsgeschwindigkeit v_0	Primary collision - driving speed (INISPEED)
Reaktionszeit t_r	0,8 s
Verzögerung/Beschleunigung a	Primary collision - mean deceleration (DECEL)
Bremsweg s_b	Primary collision - deceleration distance (DECDIST)
Endgeschwindigkeit v_1	Primary collision - collision speed (COLSPEED)
Gesamtzeit t	8 s

Abbildung 3-9 stellt die Kinematik-Toolbar im befüllten Zustand dar. Fahrzeug 1 repräsentiert einen Fall bei dem der Fahrer nicht reagiert und somit auch kein Bremsmanöver eingeleitet hat. Bei Fahrzeug 2 hingegen hat der Fahrer nach einer Reaktionszeit t_r von 0,8 s einen Bremsvorgang mit einer mittleren Verzögerung von $2,7 \text{ m/s}^2$ über einen Bremsweg s_b von 14,9 m eingeleitet. Die Toolbar berechnet unter der Vorgabe der in Tabelle 3-4 festgelegten Parameter automatisch die verbleibenden unbekanntenen Größen. Die daraus berechneten Werte werden dann als Sequenzen für die Unfalleinleitungsphase gesetzt.

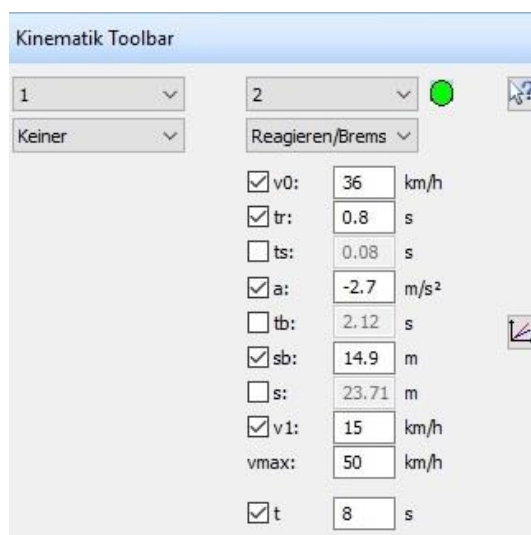


Abbildung 3-9: Kinematik-Toolbar im befüllten Zustand

Die Vorkollisionsphase wird durch die festgelegten Sequenzen und der Rekonstruktionsfolgespur vollständig beschrieben.

Um die Unfallfolgephase abzubilden wird je nach Kollisionsschwere und Unfallkonstellation die Spurverfolgung des Fahrzeugs oder eine manuelle Vorgabe eines Lenkmanövers über die Sequenzen verwendet. Spurverfolgung bedeutet, dass ein Fahrzeug versucht der Rekonstruktionsfolgespur anhand eines Fahrermodells zu folgen. Damit das Lenkmanöver bei der Simulation berücksichtigt wird, muss die Spurverfolgung im betrachteten Zeitabschnitt deaktiviert sein. Da die manuelle Vorgabe eines Lenkmanövers in den meisten Fällen erst nach der Kollision von Relevanz ist, bietet PC-Crash die Möglichkeit die Spurzuordnung ab der Kollision zu beenden. Somit folgt das Fahrzeug in der

Unfalleinleitungsphase der Rekonstruktionsfolgespur und wird dann nach dem vorgegebenen Lenkmanöver in die Endlage gelenkt.

3.2.5 Simulation des Unfallhergangs

Abschließend folgt die Simulation des Unfalls. Zunächst wird die Vorwärtssimulation durchgeführt um die Endlagen beider Fahrzeuge zu erhalten. Dabei ist ein iteratives Vorgehen notwendig, bei dem die Parameter so lange variiert werden, bis die plausibelste Endlage erreicht wird.

Nach Abschluss der Vorwärtssimulation wird die Rückwärtssimulation durchgeführt. Wie bereits erläutert ist diese nur in speziellen Fällen kinetisch möglich. Daher wird je nach Unfallkonstellation kinetisch oder kinematisch rückwärts gerechnet.

Bei der kinematischen Rückwärtssimulation folgt das Fahrzeug der Rekonstruktionsfolgespur ohne Querschleunigungen zu berücksichtigen. Daher werden im Zuge der Unfallrekonstruktion bereits vorab die Querschleunigungen auf Plausibilität überprüft, näheres dazu wird in Kapitel 4.5 näher betrachtet.

4 VIRTUELLE VORWÄRTSSIMULATION

In diesem Kapitel wird erläutert wie die Unfälle mit X-RATE simuliert werden. Zunächst wird das Simulationstool X-RATE (Extended Effectiveness Rating of Advanced Assistance Systems) diskutiert. Anschließend wird erklärt wie die Kategorisierung der unterschiedlichen Simulationsvariationen, also ob eine Notbremsfunktion aktiv ist oder nicht, durchgeführt wird. Abschließend wird beschrieben wie das Sensormodul funktioniert und wie die Eingriffsstrategie definiert ist.

Das Simulationstool X-RATE ist ein am Institut für Fahrzeugsicherheit der Technischen Universität Graz entwickeltes Tool zur Bewertung von aktiven Sicherheitssystemen. X-RATE ist in der Lage automatisiert zeitschritt-basierte Simulationen durchzuführen. X-RATE ist ein in MATLAB entwickeltes Tool welches PC-Crash zur Simulation der Fahrdynamik nützt. Die Struktur des Simulationstools ist in Abbildung 4-1 dargestellt.

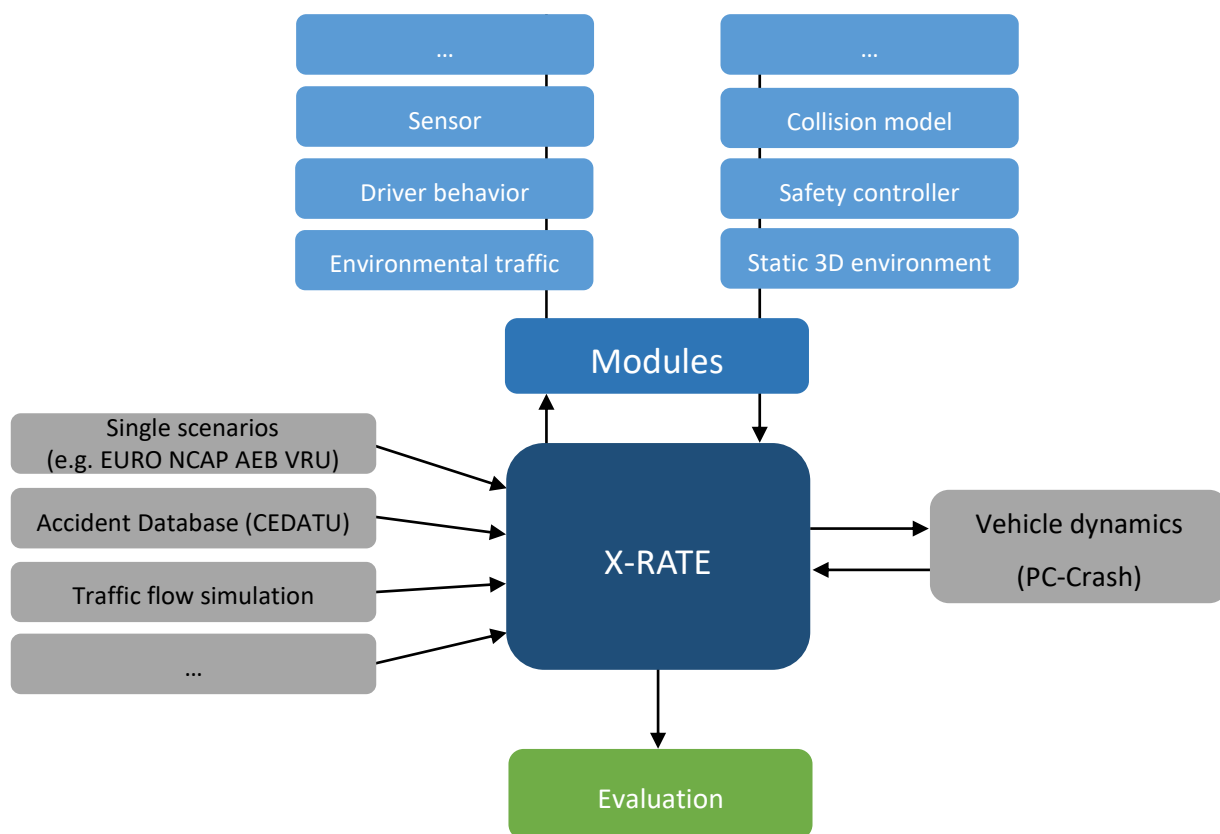


Abbildung 4-1: Funktionsstruktur des Simulationstools X-RATE

Bei der Vorwärtssimulation muss X-RATE im ersten Schritt die Fahrzeuge aus der Kollisionslage in die Ausgangsposition über eine Rückwärtssimulation rückrechnen. Dabei werden standardmäßig 7 s zurückgerechnet, damit genug Vorlaufzeit für die Simulation des Eingriffs durch eine Notbremsfunktion gegeben ist. Sofern es im Zuge der Vorwärtssimulation aufgrund des Eingriffs durch

die Notbremsfunktion zu keiner Kollision kommt, wird eine maximale Simulationszeit von 14 s nicht überschritten.

Da X-RATE das Programm PC-Crash als Solver für die Berechnung der Fahrdynamik nutzt, hat es bezüglich der Rückwärtssimulation die gleichen Rahmenbedingungen wie PC-Crash, siehe Kapitel 3.2. Daher ist eine kinetische Rückwärtsrechnung nur bedingt möglich. Bei gewissen Unfallkonstellationen, aber vor allem wenn ein Fahrzeug in der Unfalleinleitungsphase eine Kurve durchfährt, entsteht eine deutliche Abweichung des Kollisionspunktes und es liegt eine örtliche Diskrepanz vor. Diese Abweichungen sollen anhand eines Beispiels, bei dem ein Fahrzeug relativ gerade fährt und das andere in der Vorkollisionsphase eine Kurve durchfährt, veranschaulicht werden. Anhand von drei Varianten wird an einem Beispiel untersucht, wie sich die kinetische Berechnung gegenüber der kinematischen Berechnung auswirkt. Tabelle 4-1 stellt die drei Varianten gegenüber. Variante 1 bedeutet, dass beide Simulationen kinematisch erfolgen. Bei Variante 2 erfolgt die Rückwärtssimulation kinematisch und die Vorwärtssimulation kinetisch und bei Variante 3 werden beide Simulationen kinetisch gerechnet.

Tabelle 4-1: Variation der Berechnungsmethoden

Variation der Berechnungsmethoden		
Variante	Rückwärtssimulation	Vorwärtssimulation
1	Kinematisch	Kinematisch
2	Kinematisch	Kinetisch
3	Kinetisch	Kinetisch

Aus Abbildung 4-2 ist ersichtlich, dass bei der Rückwärtsrechnung ein deutlicher Unterschied zwischen Variante 1 und 2 gegenüber Variante 3 besteht. Der Ausgangspunkt der Rückwärtsrechnung ist in der Mitte der Kreuzung, markiert durch den roten Kreis. Die rosa beziehungsweise grüne Linie entsprechen der Unfallfolgespur.

Abbildung 4-3 stellt die Vorwärtsrechnung nach einem Zeitpunkt von $t = 7$ s dar. Das Fahrzeug wird bei Variante 1 exakt zur Kollisionskonstellation simuliert während bei den beiden anderen Varianten eine örtliche Abweichung entsteht. Die Abweichung ist bei Variante 3 am größten. Sowohl bei Variante 2 als auch Variante 3 würde es zu diesem Zeitpunkt zu keiner Kollision kommen. Das hat zur Folge, dass die Kollision erst zu einem späteren Zeitpunkt stattfindet und sich die Kollisionskonfiguration verändert. Das Ergebnis weicht somit von der Ausgangslage ab und ist für eine weitere Betrachtung nicht geeignet. Um die Beispiele automatisiert rechnen zu können und eine Vergleichbarkeit herzustellen wird die Rückwärtssimulation sowie die Vorwärtssimulation kinematisch (Variante 1) gerechnet.

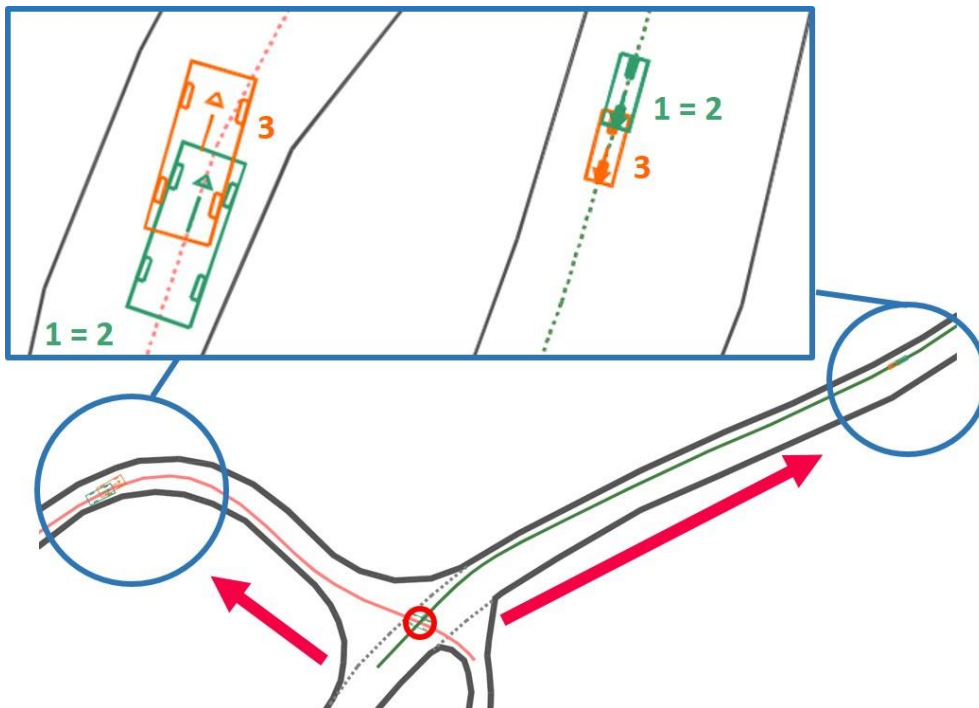


Abbildung 4-2: Abweichung beim Ausgangspunkt der Vorwärtssimulation

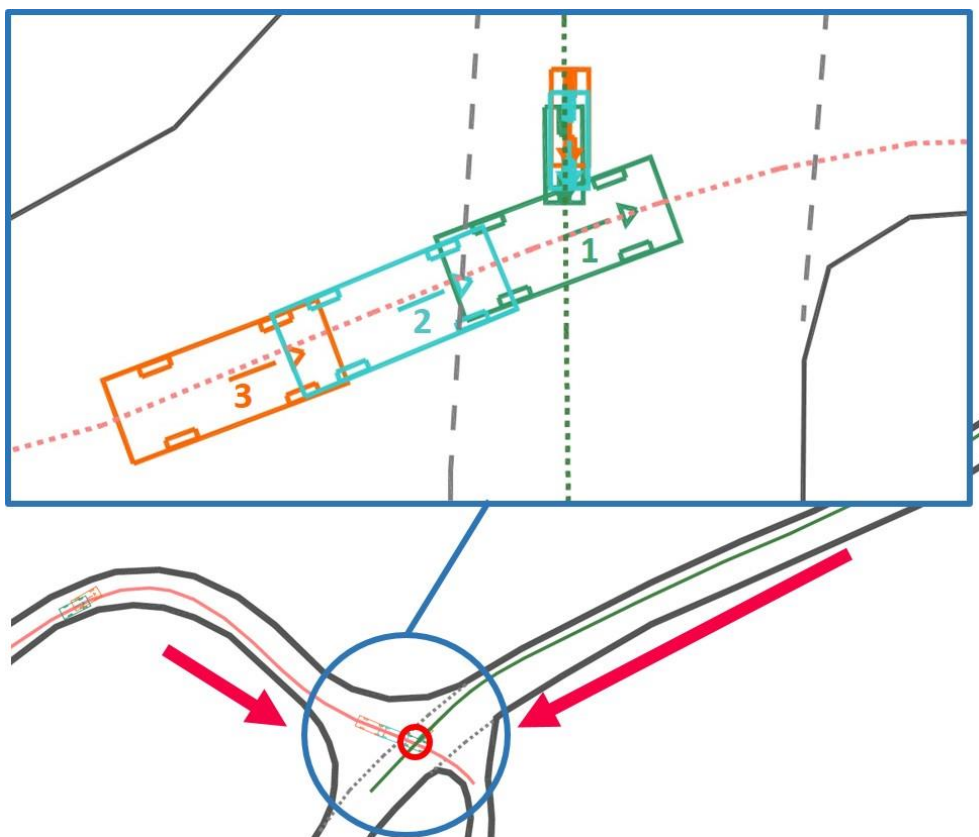


Abbildung 4-3: Abweichung der Fahrzeuge bei einer Simulationszeit von $t = 7 \text{ s}$

4.1 Kollisionsmodell von X-RATE

Die automatisierte Ermittlung des Stoßpunkts (Point Of Impact) und der Berührebene in X-RATE erfolgt unter Zuhilfenahme von geometrischen Zusammenhängen der Kollision. Die Vorgehensweise ist schematisch in Abbildung 4-4 dargestellt.

Aufgrund der Eindringtiefe (penetration depth) bei der Kollision entsteht eine Fläche innerhalb der Polylinien der beiden Fahrzeuge. Diese Fläche wird in Abbildung 4-4 schwarz umrandet dargestellt. X-RATE berechnet den Flächenschwerpunkt dieser Fläche und legt ihn als Stoßpunkt fest. Dieser Stoßpunkt wird in Abbildung 4-4 als „Point Of Impact = Centroid of overlap“ bezeichnet. Der Stoßpunkt kann vom manuell definierten Stoßpunkt, welcher im Zuge der Rekonstruktion mit PC-Crash festgelegt wurde, abweichen. [32]

Im nächsten Schritt ermittelt X-RATE die zwei Schnittpunkte der beiden Fahrzeugpolylinien. Diese Schnittpunkte werden als „intersection points of vehicle exterior“ bezeichnet. Die Verbindung beider Schnittpunkte ergibt eine Linie, welche durchgehend blau gefärbt ist. Diese Linie wird auf den POI parallel verschoben und definiert die Berührebene. Diese Berührebene wird als gestrichelte blaue Linie dargestellt und als „Contact plane“ bezeichnet. [32]

Damit X-RATE die automatische Berechnung der Berührebene und des Stoßpunktes fehlerfrei durchführen kann, wird eine Eindringtiefe von 30 ms festgelegt. Ein Wert von 0 oder 15 ms kann je nach Unfallkonstellation bewirken, dass das Kollisionsmodell keine Stoßparameter ausgibt.

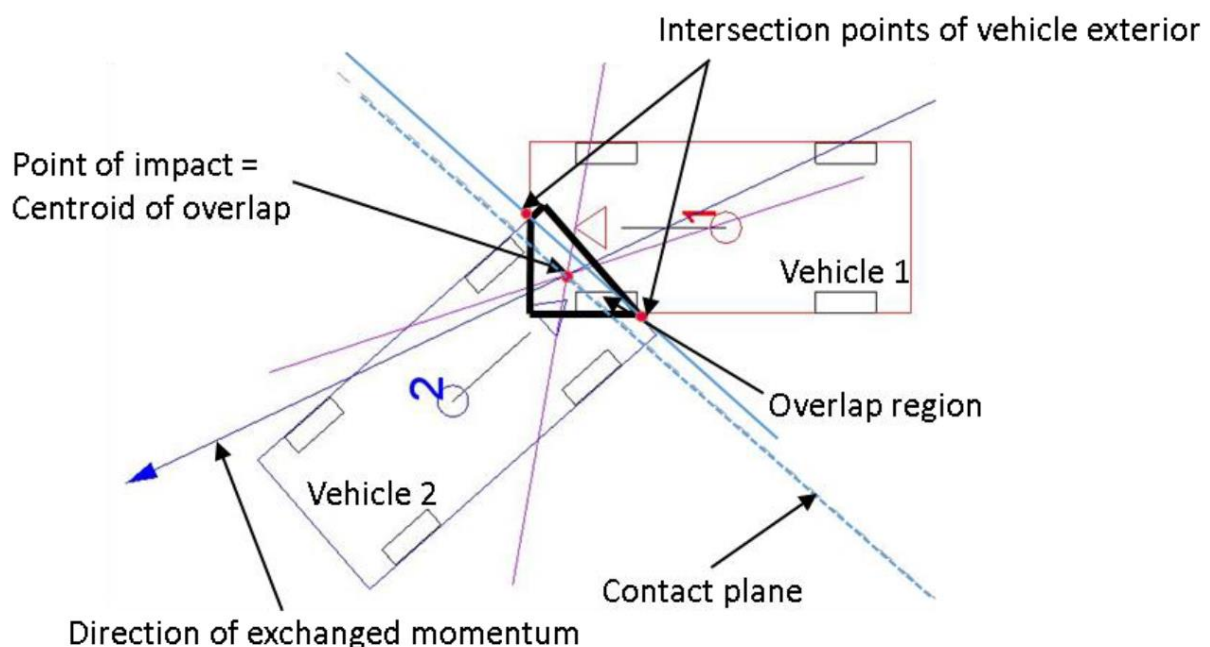


Abbildung 4-4: Automatisierte Ermittlung der Berührebene und des Stoßpunkts (POI) durch X-RATE [32]

4.2 Simulationsvariationen

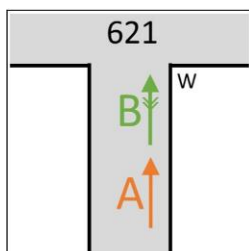
Aus den in Kapitel 3.1.2 angewendeten Filterkriterien folgt, dass nur Unfälle mit zwei Unfallbeteiligten betrachtet werden. Aus dieser Konfiguration ergeben sich vier mögliche Szenarien, dargestellt in Tabelle 4-2. Das Szenario, bei welchem keines der beiden Fahrzeuge mit einer Notbremsfunktion ausgestattet ist, bildet das Ausgangsszenario und wird in weiterer Folge als Baseline bezeichnet. Die Szenarien, bei welchen ein Fahrzeug oder beide Fahrzeuge mit einer Notbremsfunktion ausgestattet sind, werden als Treatment-Simulation oder kurz Treatment bezeichnet. Sofern ein Fahrzeug mit einer Notbremsfunktion ausgestattet ist, wird dieses in weiterer Folge als „Automated Vehicle“ oder AV bezeichnet. Besitzt das Fahrzeug keine Notbremsfunktion, wird dieses als „Conventional Vehicle“ oder CV bezeichnet.

Tabelle 4-2: Darstellung der in der Arbeit betrachteten Szenarien

Eingriffsstrategie in Abhängigkeit des Szenarios		
Szenario	Fahrzeug A	Fahrzeug B
1: Baseline	CV	CV
2: Treatment A	AV	CV
3: Treatment B	CV	AV
4: Treatment A + B	AV	AV

Die Zuordnung der Unfallbeteiligten erfolgt analog zur Definition der Zuordnung bei den Unfalltypen, bei welchen das Fahrzeug A den Unfallverursacher und das Fahrzeug B den nicht verursachenden Unfallbeteiligten darstellt. Als Beispiel stellt Abbildung 4-5 die Zuordnung bei einem Auffahrunfall dar, bei dem das auffahrende Fahrzeug als Fahrzeug A bezeichnet wird, da der Fahrer dieses Fahrzeugs den Unfall verursacht. Das andere Fahrzeug wird als Fahrzeug B bezeichnet.

Abbildung 4-5: Einteilung der Unfallbeteiligten in Fahrzeug A und Fahrzeug B



4.3 Sensorkonfiguration

Ein wesentlicher Faktor für die Treatment-Simulation ist die Sensorkonfiguration. Der Sensor basiert darauf geometrische Objekte zu detektieren und anschließend zu klassifizieren. Um ein Objekt zu erkennen, emittiert der Sensor Strahlen mit einer Winkelauflösung von $0,1^\circ$. Abbildung 4-6 stellt die Funktionsweise des Sensors dar. Die roten Richtungspfeile stellen die einzelnen Sensorstrahlen dar, welche durch die horizontale Sensorauflösung in der x-y Ebene voneinander abweichen. Die Sensorstrahlen gehen vom Schwerpunkt (CoG) aus. Je weiter sich die Strahlen vom Fahrzeug entfernen desto größer ist auch der nicht erfasste Bereich zwischen den Strahlen. Zusätzlich ist auch noch der FoV dargestellt, welcher in dieser Arbeit 360° beträgt. Die Reichweite ist durch einen Kreis mit dem Radius von 200 m begrenzt. Diese Begrenzung wird in der Abbildung durch den offenen roten Kreis dargestellt. Die Klassifizierung sowie die Detektion eines Objekts ist durch die Reichweite, die Sensorauflösung und den FoV begrenzt.

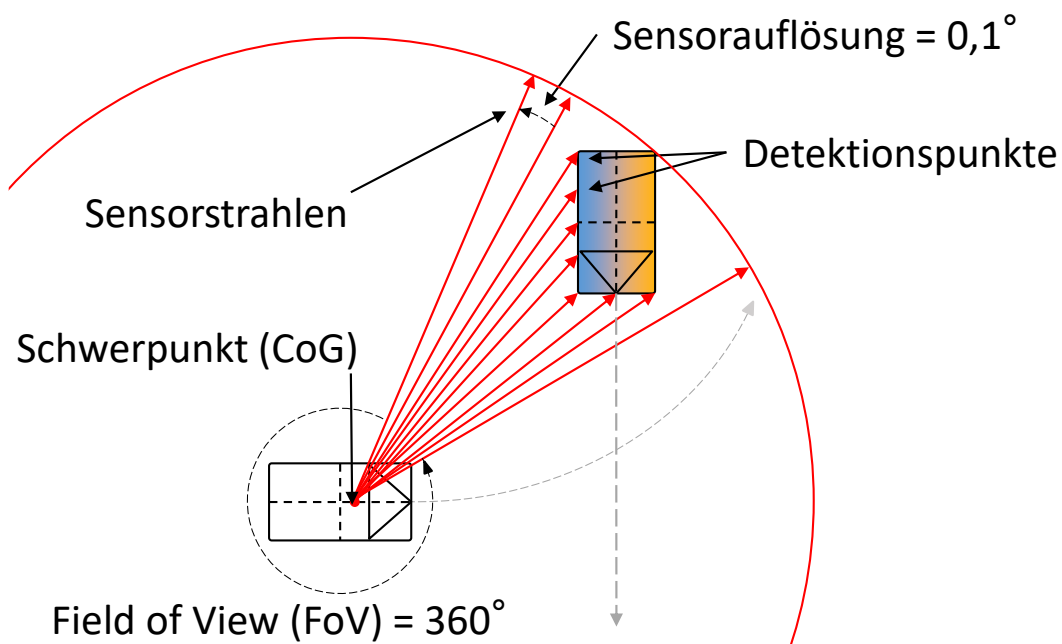


Abbildung 4-6: Schematische Darstellung der Funktionsweise des Sensors

Sofern ein Sehstrahl des Sensors auf ein Objekt innerhalb dieser Grenzen auftrifft kann die verbleibende Zeit bis zur Kollision (TTC) über die Relativgeschwindigkeit v_{rel} sowie dem Abstand zum Objekt berechnet werden, siehe Abbildung 4-7.

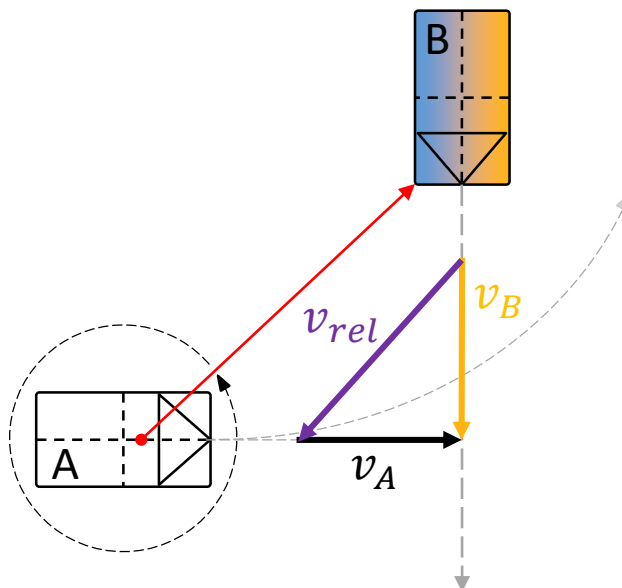


Abbildung 4-7: Relativgeschwindigkeit zwischen Fahrzeug A und Fahrzeug B

Die für die Berechnung des TTC benötigte Relativgeschwindigkeit berechnet sich aus der Differenz des Geschwindigkeitsvektors der beiden Fahrzeuge:

$$\vec{v}_{BA} = \vec{v}_{rel} = \vec{v}_B - \vec{v}_A \quad \text{Formel 4-1: Ermittlung der Relativgeschwindigkeit [2]}$$

In den meisten Fällen treffen mehrere Sehstrahlen gleichzeitig auf ein Objekt auf, siehe Abbildung 4-6. Daher wird aus allen berechneten TTC der kleinste Wert herangezogen und als Referenzwert für die Eingriffsstrategie festgelegt. Dieser Vorgang wird in Formel 4-2 beschrieben:

$$TTC_{Referenz} = \text{Minimum} \left(\frac{d_i}{v_{rel,i}} \right) [s] \quad \text{Formel 4-2: Referenzwert für die Eingriffsstrategie}$$

$$i = 1, 2, \dots, n$$

In Tabelle 4-3 sind die Parameter für das Sensormodul in X-RATE zusammengefasst und wie folgt zu verstehen:

- Die Sensorauflösung in Grad ergibt sich aus der Division des Öffnungswinkels durch die Auflösung. Diese beträgt in der Horizontalen 0,1° und in der Vertikalen 1°.
- Sobald der Sensor ein Objekt detektiert hat benötigt er eine Erfassungszeit von 150 ms um ein Objekt zu klassifizieren. Die minimale Überdeckung zur Klassifizierung darf in dieser Zeit nicht unterschritten werden.
- „Minimale Überdeckung zur Detektion“ bedeutet, dass bei einem Wert von 1% mindestens ein Sensorstrahl auf ein Objekt innerhalb der Sensorreichweite auftreffen muss, damit eine Detektion stattfindet. Analog dazu ist die „minimale Überdeckung zur Klassifizierung“ zu verstehen.

- Die Integrationsschrittweite gibt an wie viel Zeit zwischen den einzelnen Detektionsschritten vergeht.

Tabelle 4-3: Sensorkonfiguration bei der Treatment-Simulation

Sensorkonfiguration		
Parameter	Wert	Einheit
Reichweite	200	[m]
Hor. Öffnungswinkel	360	[deg]
Hor. Auflösung	3600	[]
Ver. Öffnungswinkel	1	[deg]
Ver. Auflösung	1	[]
Erfassungszeit	0.15	[s]
Min. Überdeckung zur Detektion	1	[%]
Min. Überdeckung zur Klassifizierung	1	[%]
Integrationsschrittweite	100	[Hz]
Sensorposition	CoG	[]

4.4 Eingriffsstrategie

Die Eingriffsstrategie besteht darin, dass das Fahrzeug der ursprünglichen Trajektorie folgt und ein Bremsmanöver einleitet. Das Bremsmanöver setzt sich aus mehreren einzelnen Phasen zusammen und ist in Abbildung 4-8 chronologisch dargestellt. In diesem Kapitel soll nun die einzelnen Phasen gezeigt werden.

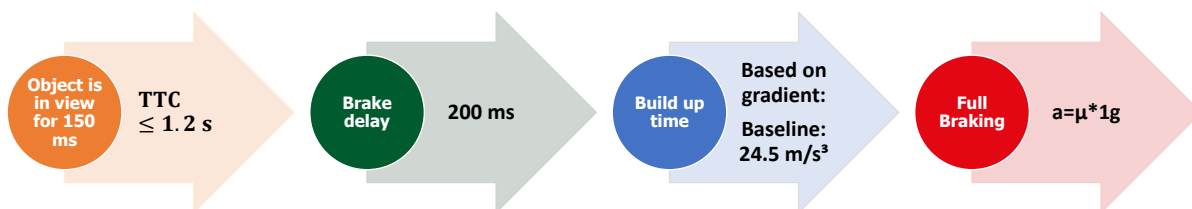


Abbildung 4-8: Zeitliche Phasen der Eingriffsstrategie

Die Eingriffsstrategie beginnt mit der Detektion des Objekts. Die Detektion erfolgt dann, wenn ein Sensorstrahl auf ein Objekt innerhalb der Sensorreichweite auftrifft. Danach wird eine Erfassungszeit von 150 ms definiert, um ein Objekt zu klassifizieren. Nach der Klassifizierung überprüft das System ob das Auslösekriterium erfüllt wird. Für die Gesamtauswertung (Kapitel 6.2) und für die Auswertung nach Unfalltypen (Kapitel 6.3) wird als Auslösekriterium ein TTC von kleiner-gleich 1,2 s festgelegt. Um den Einfluss des TTC auf die Vermeidbarkeit und Minderung zu untersuchen (Kapitel 6.4) wird das Auslösekriterium in einem Wertebereich von 0,8 bis 1,6 s variiert.

Sobald dieses Kriterium erfüllt wird, aktiviert das Funktionsmodell das Bremsaktuatormodell. Das Bremsaktuatormodell leitet eine Bremsung ein, welche aus drei Phasen besteht. Abbildung 4-9 stellt die Bremsverzögerungsverläufe für trockene ($\mu = 0,8$) sowie für nasse ($\mu = 0,5$) Fahrbahnverhältnisse dar.

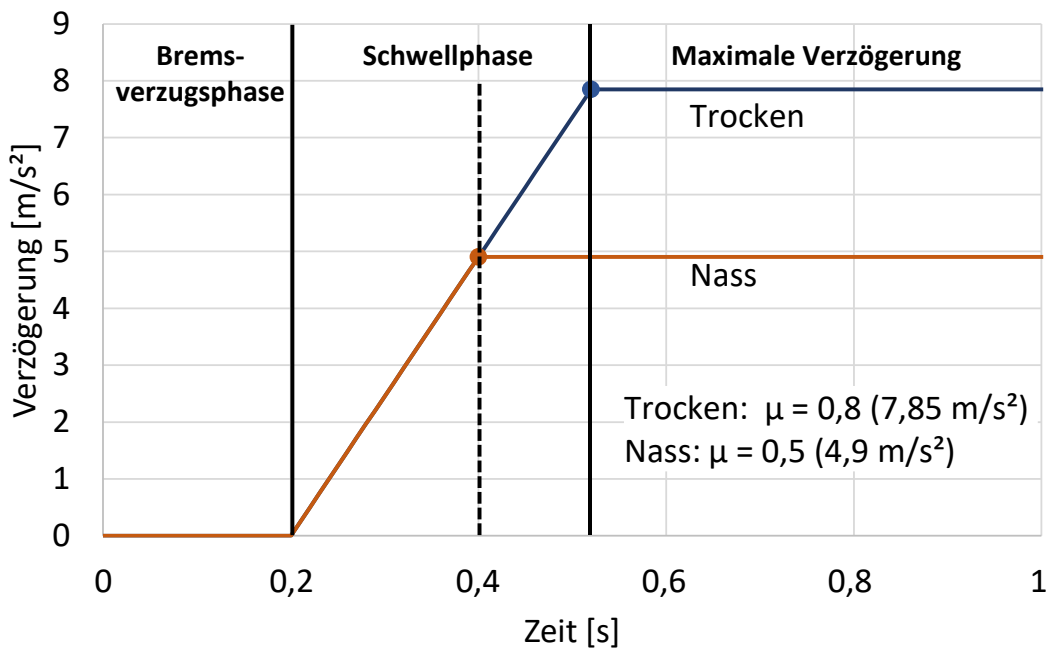


Abbildung 4-9: Verlauf der Bremsverzögerung über die Zeit

Die erste Phase ist die Bremsverzugsphase und stellt die Reaktionszeit eines Bremssystems nach. Die Phase wird mit einer Zeit von 0,2 s festgelegt. In dieser Phase findet noch keine Verzögerung statt.

Die zweite Phase ist die Schwellphase bei der die Verzögerung linear bis zur maximalen Verzögerung aufgebaut wird. Die maximale Verzögerung ist abhängig vom Reibungskoeffizienten der Fahrbahn. Der Verzögerungsgradient ist unabhängig von der Fahrbahn mit 24,5 m/s³ festgelegt. Die zum Erreichen der maximalen Verzögerung benötigte Zeit wird als „build-up time“ bezeichnet und errechnet sich nach Formel 4-3:

$$\text{build – up time} = \frac{\text{Maximale Verzögerung}}{\text{Verzögerungsgradient}} \text{ [s]} \quad \text{Formel 4-3: Ermittlung der build-up time [5]}$$

Tabelle 4-4 stellt die Schwellzeit für die beiden Fahrbahnverhältnisse gegenüber. Bei nassen Fahrbahnverhältnissen wird die maximale Verzögerung schneller erreicht. Daher ist der Übergang in Abbildung 4-9 mit einer unterbrochenen schwarzen Linie dargestellt. Nach der Aufbauzeit beginnt die letzte Phase bei dem die maximale Bremsverzögerung vorhanden ist und konstant bleibt.

Tabelle 4-4: Schwellzeit in Abhängigkeit der Fahrbahnverhältnisse

Schwellzeit in Abhängigkeit der Fahrbahnverhältnisse		
Fahrbahnzustand	Schwellzeit	
Max. Verzögerung trockene Fahrbahn $\mu \cdot g$ ($\mu = 0,8$)	7,85 [m/s ²]	0,32 [s]
Max. Verzögerung nasse Fahrbahn $\mu \cdot g$ ($\mu = 0,5$)	4,91 [m/s ²]	0,2 [s]

Abbildung 4-10 stellt die einzelnen Phasen der Eingriffsstrategie nach Abbildung 4-8 anhand eines Beispiels (Szenario 2, $\mu = 0,8$) dar. Die Notbremsfunktion verzögert das Fahrzeug des Unfallverursachers von einer Ausgangsgeschwindigkeit von 33 km/h bis zum Stillstand. Bei dem gezeigten Beispiel ist das Fahrzeug B zunächst durch ein Sichthindernis verdeckt. Die Detektion sowie die Klassifikation erfolgt trotzdem vor einem TTC von 1,2 s. Bei der grünen Linie liegt ein TTC von 1,2 s vor und der Bremsengriff wird mit der Bremsverzugsphase eingeleitet. Ab der blauen Linie baut sich die Bremsverzögerung auf. Bei der roten Linie ist die volle Bremsverzögerung erreicht und das Fahrzeug bremst bis zum Stillstand. Der Unfall wird durch das Treatment vermieden.

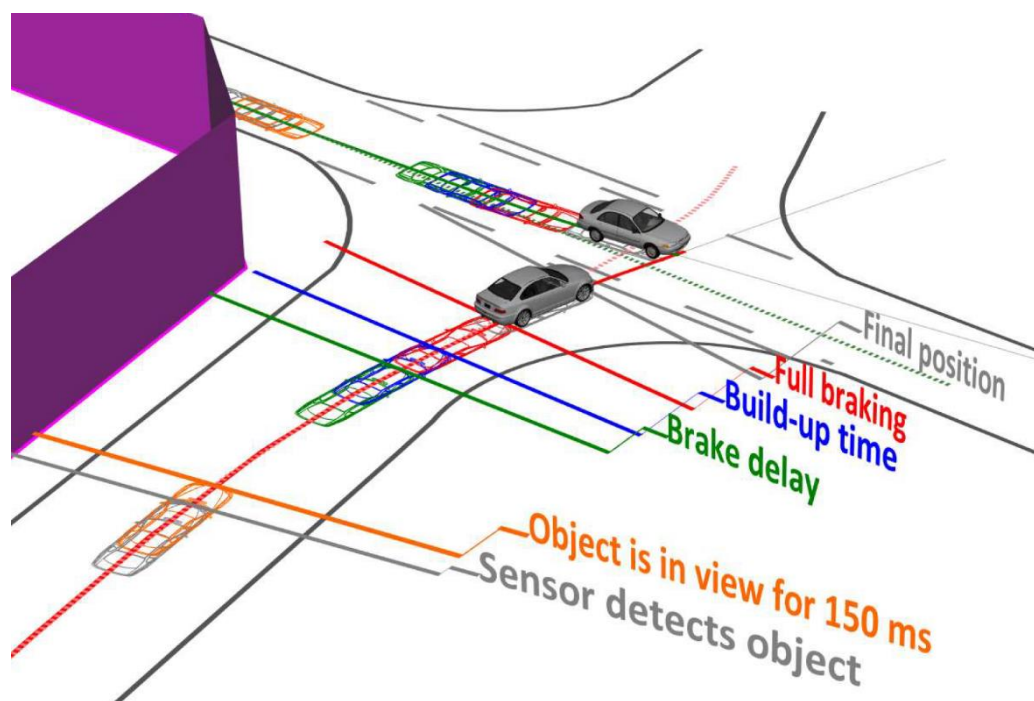


Abbildung 4-10: Die Eingriffsstrategie dargestellt anhand eines Beispiels

4.5 Plausibilitätsprüfung

Aufgrund der kinematischen Rückwärtssimulation kann es zur Überschreitung der maximalen Querbeschleunigung sowie der maximal resultierenden Beschleunigung kommen, da keine Querbeschleunigungen bei der Simulation berücksichtigt werden. Die maximalen Beschleunigungswerte werden durch den Fahrbahnzustand und das maximal übertragbare Kraftniveau des Reifens begrenzt. Der Grund für hohe Beschleunigungswerte liegt darin, dass selten exakte Trajektorien der beiden Fahrzeuge in der IGLAD-Datenbank angegeben sind. Daher wird in diesem Kapitel erläutert, wie die Beschleunigungen durch eine Plausibilitätsprüfung überprüft werden. Bei einer exakt geraden Fahrbewegung muss der Reifen keine Seitenkräfte übertragen und kann laut Kamm'schen Reibungskreis die ganze zur Verfügung stehende übertragbare Kraft für die

Längsverzögerung nutzen, siehe Anhang A. Sobald Querkräfte auftreten wird die maximal übertragbare Längskraft immer geringer. Für ein Fahrzeug, welches sich in einer Kurve befindet, würde das bedeuten, dass die maximal möglich Bremsverzögerung bei gleichbleibenden Kurvenradius im Vergleich zu einer reinen Längsbewegung geringer ist. Bei einer Vollbremsung wird das Fahrzeug aufgrund der fehlenden Möglichkeit Querkräfte zu übertragen instabil und beginnt zu Über- oder Untersteuern. Daher werden in dieser Arbeit für die resultierende Beschleunigung und für die Querbeschleunigung Grenzwerte festgelegt.

Der kritische Sicherheitswert für die Seitenführung wird in der Literatur [2] mit $\mu_s = 0,55$ und der Grenzwert mit rund $\mu_s = 0,6$ angegeben. Für diese Arbeit wird der kritische Sicherheitswert ($\mu_s = 0,55$) als Grenzwert herangezogen. Um die maximale Querbeschleunigung ermitteln zu können, gilt für eine ebene Fahrbahn: [2]

$$a_q = g * \mu_s \quad \text{Formel 4-4: Ermittlung der Querbeschleunigung [2]}$$

Durch diesen Zusammenhang ergibt sich für einen Seitenreibungswert von $\mu_s = 0,55$ eine maximale Querbeschleunigung von $5,4 \text{ [m/s}^2\text{]}$. Dieser Wert ist gültig für eine trockene Fahrbahn mit einem in der Regelstrategie gewählten Reibwert von $\mu = 0,8$. Weicht der Reibwert ab, wird für die Berechnung der Querbeschleunigung folgende Annahme getroffen:

$$a_q = 5,4 * \frac{\mu}{0,8} \text{ [m/s}^2\text{]} \quad \text{Formel 4-5: Annahme für } a_q \text{ in Abhängigkeit des Fahrbahnzustands}$$

In ist die maximale Querbeschleunigung für eine nasse Fahrbahn mit $\mu = 0,5$ berechnet.

Das ABS arbeitet in einem Bereich des Bremschlupf, welcher es dem Fahrer trotz bestmöglicher Bremsverzögerung ermöglicht eine Lenkbewegung durchzuführen. Bei einer Bremsung darf nach dem Kamm'schen Reibungskreis nicht 100% der übertragbaren Kraft für die Bremskraft genutzt werden, da sonst keine Seitenführungskraft mehr aufgenommen werden kann. Daher wird die maximale Längsverzögerung nicht vollständig genutzt und der Regelbereich des ABS so gewählt, dass eine optimale Lenkbarkeit und Fahrstabilität gegeben ist. [5] Darum wird für die maximal resultierende Verzögerung die Annahme getroffen, dass die Eingriffsstrategie eine Seitenführungskraft des Reifens und somit ein Lenkmanöver zulässt. Die maximale resultierende Verzögerung wird mit dem 1,1-fachen der in der Regelstrategie festgelegten maximalen Bremsverzögerung definiert und ist in Tabelle 4-5 für eine trockene und eine nasse Fahrbahn berechnet.

Tabelle 4-5: Beschleunigungsgrenzwerte in Abhängigkeit des Fahrbahnzustands

Zulässige Verzögerungswerte in Abhängigkeit des Straßenzustands		
Parameter	Straßenzustand	Wert
Maximale Bremsverzögerung	trocken ($\mu=0,8$)	$0,8 * 9,81 = 7,85$ [m/s ²]
Maximale resultierende Beschleunigung	trocken ($\mu=0,8$)	$7,85 * 1,1 = 8,6$ [m/s ²]
Maximale Querbeschleunigung	trocken ($\mu=0,8$)	$0,55 * 9,81 = 5,4$ [m/s ²]
Maximale Bremsverzögerung	nass ($\mu=0,5$)	$0,5 * 9,81 = 4,9$ [m/s ²]
Maximale resultierende Beschleunigung	nass ($\mu=0,5$)	$4,9 * 1,1 = 5,4$ [m/s ²]
Maximale Querbeschleunigung	nass ($\mu=0,5$)	$5,4 * 0,5/0,8 = 3,4$ [m/s ²]

Unter Berücksichtigung der maximalen Verzögerung sowie des kritischen Seitenreibungswerts ergibt sich ein zulässiger Beschleunigungsbereich, welcher in Abbildung 4-11 dargestellt ist. Der Richtungspfeil beschreibt den resultierenden Beschleunigungsvektor für einen fiktiven Punkt innerhalb des zulässigen Bereichs. Die orange Linie beschreibt die maximal zulässige Verzögerung und die blaue Linie beschreibt die Grenze welche durch die maximal zulässige Querbeschleunigung verursacht wird.

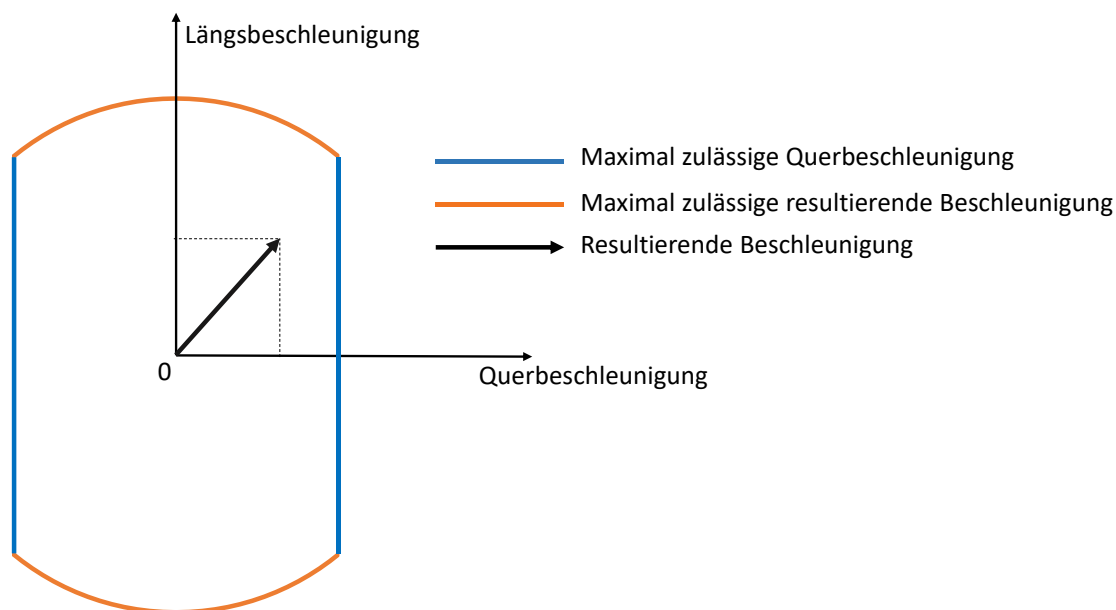


Abbildung 4-11: Grenzwerte für die Beschleunigung

Die Analyse der Beschleunigungswerte wird nach der Vorwärtssimulation für jedes Szenario durchgeführt und im gesamten Zeitraum bis zu einer möglichen Kollision betrachtet. Die Analyse erfolgt durch ein Matlab-Skript, welches die Beschleunigungswerte aus der Ausgabedatei von X-RATE bezieht und einen Abgleich mit den in Tabelle 4-5 definierten Grenzwerten durchführt. Sofern die Querbeschleunigungswerte oder die maximal zulässigen Verzögerungswerte die Grenzwerte überschritten haben, werden die Unfälle aus der weiteren Betrachtung ausgeschlossen. Somit werden Unfälle ausgeschlossen, bei denen bereits in der Baseline eines der beiden Fahrzeuge einen instabilen Fahrzeugzustand in der Vorkollisionsphase aufweist. Ebenso werden Fälle ausgeschlossen, bei denen ein Fahrzeug in der Baseline bereits am Limit der maximal übertragbaren Reifenkräfte ist und somit

eine Verzögerung, mit den in der Regelstrategie vorgegebenen Werten, bei gleichbleibender Fahrzeugtrajektorie nicht möglich ist.

5 AUSWERTUNG

In diesem Abschnitt wird auf die einzelnen Auswertungsmethoden gezeigt. Es werden neben den statistischen Auswertemethoden wie Box-Plots und Histogramme auch eigene Darstellungen für die Auswertung der Unfallparameter und zur Visualisierung der Kollisionskonfiguration sowie der Kollisionswinkel verwendet. Diese sollen an dieser Stelle näher betrachtet werden.

5.1 Box-Plot

Zur Darstellung der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung sowie der Kollisionsgeschwindigkeit werden Box-Plots verwendet. Bei den Box-Plots wird ein Vergleich zwischen der Baseline und dem jeweiligen Szenario durchgeführt, siehe als Beispiel Abbildung 5-1.

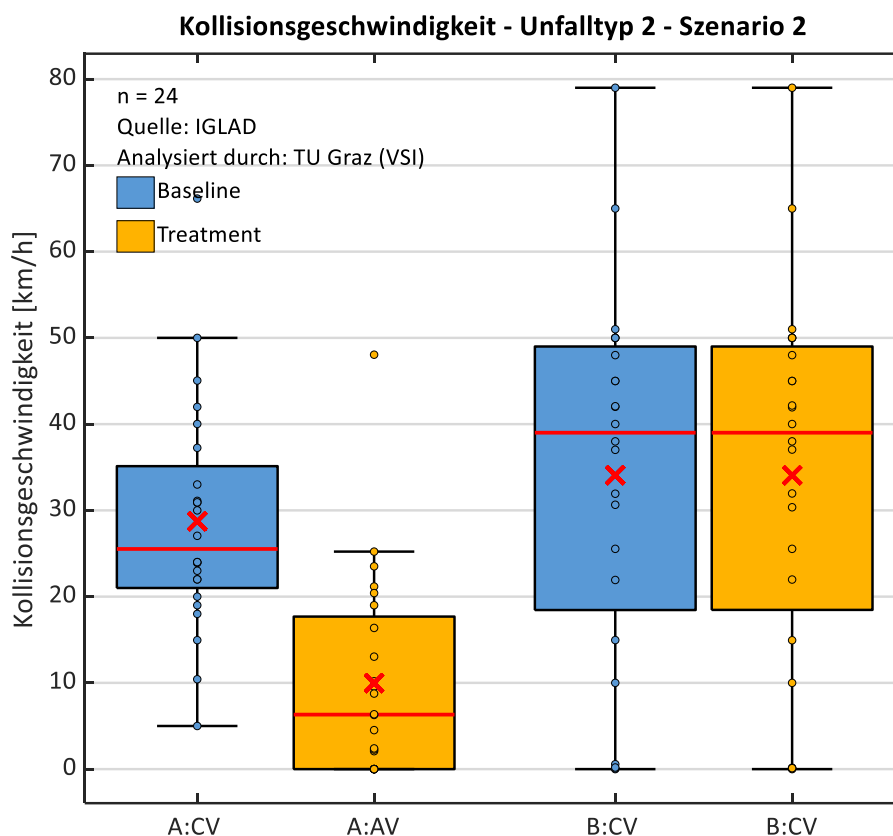


Abbildung 5-1: Beispiel eines Box-Plots

Auf der linken Seite befinden sich die Plots des Fahrzeugs A, also des Unfallverursachers, und auf der rechten Seite die des Fahrzeugs B, also des nicht unfallverursachenden Unfallbeteiligten. Das Baseline-Szenario ist in Blau und das Treatment-Szenario in Gelb abgebildet. Bei der horizontalen Achsenbeschriftung steht CV für „Conventional Vehicle“ und AV für „Automated Vehicle“.

Die rote durchgehende Linie gibt den Median an und beschreibt jenen Wert, bei dem sich 50% der nach der Größe sortierten Datenwerte oberhalb beziehungsweise unterhalb befinden. Bei einer ungeraden Anzahl an Datenwerten ist der mittlere Datenwert der Median. Bei einer geraden Anzahl an Daten wird aus den zwei in der Mitte gelegenen Datenwerten der arithmetische Mittelwert berechnet und dieser als Median gesetzt. [33]

Die Box gibt den Bereich an, in welchem sich 50% der Daten befinden und wird durch das 25%- (q_1) und 75%- Perzentil (q_3) begrenzt. Das bedeutet, dass sich 25% der Daten oberhalb beziehungsweise 25% unterhalb der Box befinden. Die Antennen, welche auch als „Whisker“ bezeichnet werden, berechnen sich wie folgt: [33]

$$\text{upper whisker length} = q_3 + 1,5 * (q_3 - q_1) \quad \text{Formel 5-1: Berechnung des oberen Whisker [33]}$$

$$\text{lower whisker length} = q_1 - 1,5 * (q_3 - q_1) \quad \text{Formel 5-2: Berechnung des unteren Whisker [33]}$$

Die einzelnen Unfälle werden als Punkte entlang der Mitte dargestellt. Befindet sich ein Datenpunkt oberhalb oder unterhalb der oberen beziehungsweise unteren Antenne ist dieser als Ausreißer zu betrachten. Das rote Kreuz stellt das arithmetische Mittel dar.

5.2 Darstellung der Kollisionskonfiguration

Die Beschreibung der Kollisionskonfiguration folgt in Anlehnung an die Volvo Parametric Crash Configuration (VPARCC) von Wagström et al. (2019) [34]. Zum Beschreiben der Positionen der Fahrzeuge zueinander werden die Werte auf ein lokales Fahrzeugkoordinatensystem bezogen. X-RATE gibt für jedes Fahrzeug die Schwerpunktkoordinaten sowie den Kollisionspunkt im globalen sowie im jeweiligen Fahrzeugkoordinatensystem an. Um beide Fahrzeuge über ein lokales Fahrzeugkoordinatensystem darstellen zu können, müssen im ersten Schritt die Koordinaten des zweiten Fahrzeugs in das lokale Fahrzeugkoordinatensystem des ersten Fahrzeugs umgerechnet werden. Dies erfolgt über eine Koordinatentransformation. Dieser Vorgang wird für den Zeitpunkt der Kollision sowie für neun Zeitschritte davor durchgeführt damit sichergestellt wird, dass der Zeitpunkt bei dem der Erstkontakt („First Point Of Contact“ oder kurz FPOC) stattfindet beinhaltet ist. Abbildung 5-2 stellt diesen Vorgang für eine Kollision dar.

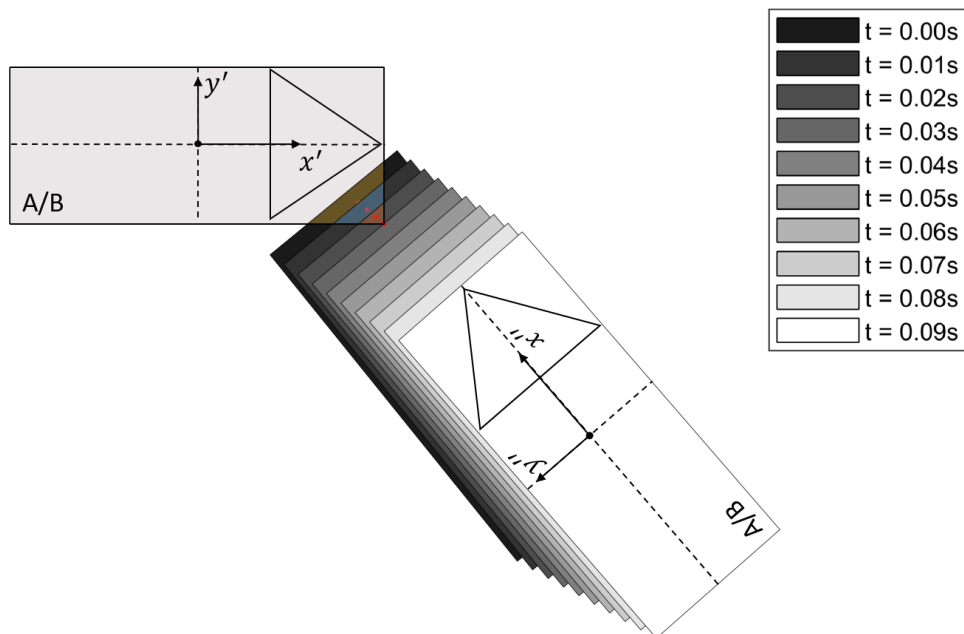


Abbildung 5-2: Kollisionskonfiguration im x',y' -Fahrzeugkoordinatensystem

Um die Kollisionskonfiguration auswerten zu können wird in weiterer Folge immer der erste Kontaktpunkt betrachtet. Dieser unterscheidet sich vom Stoßpunkt (POI) der X-RATE Simulation aufgrund der in der Simulation gewählten Eindringtiefe. In Abbildung 5-3 sind die Zeitpunkte $t = 0,00$ s mit dem POI und $t = 0,03$ s mit dem FPOC für die zuvor betrachtete Kollision ersichtlich. Es ist erkennbar, dass sich der FPOC deutlich vom POI unterscheidet.

Um den Zeitschritt zu ermitteln, bei welchem der FPOC vorliegt, sind fünf Schritte in der Software MATLAB R2018b notwendig. Aus den Fahrzeugaußenkonturen wird zunächst ein Polyshape erstellt und darauf die geometrische Überschneidung beider Fahrzeuge für den jeweiligen Zeitschritt ermittelt. Danach wird die Fläche der einzelnen Überschneidungen sowie der geometrische Mittelpunkt der jeweiligen Fläche berechnet. Abschließend wird der geometrische Mittelpunkt des Zeitschritts mit der kleinsten Überschneidungsfläche als FPOC festgelegt.

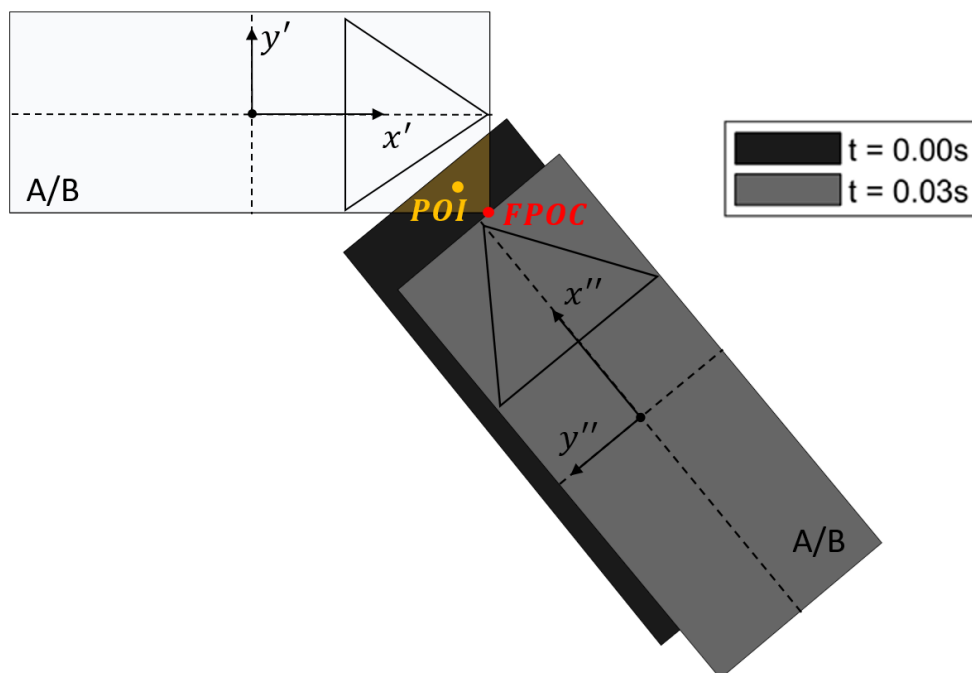


Abbildung 5-3: Unterschied zwischen POI und FPOC

Neben dem FPOC und den Fahrzeugabmessungen sind zur vollständigen Beschreibung der Kollisionskonfiguration der Kollisionswinkel („Collision Angle“ oder kurz CA) sowie der Gierwinkel des anderen Fahrzeugs bezogen auf das lokale Koordinatensystem („Opponent Yaw Angle“ oder kurz OYA) notwendig. Diese Größen sind in Abbildung 5-4 ersichtlich.

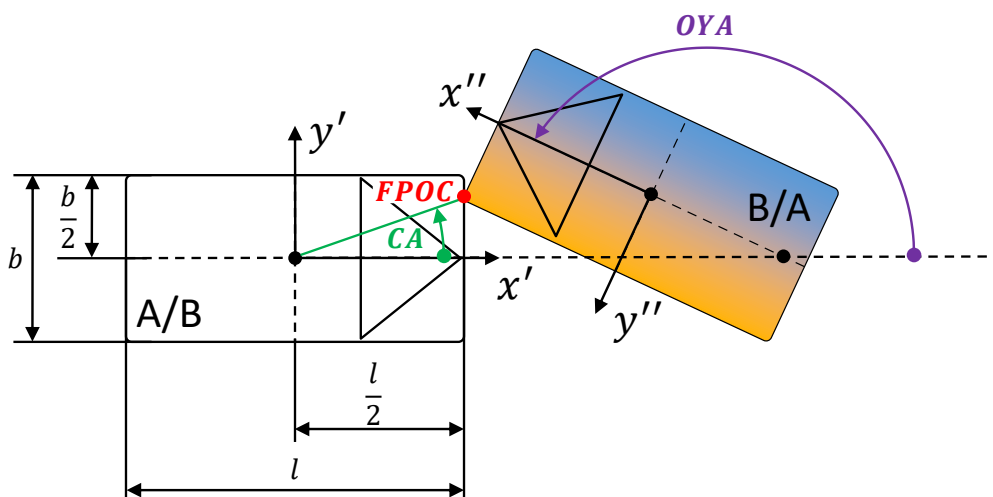


Abbildung 5-4: Definition des Kollisionswinkels und des Gierwinkels [34]

Das lokale Koordinatensystem wird immer in der Fahrzeugmitte angesetzt. Um die Gegenüberstellung der einzelnen Kollisionskonfigurationen zu ermöglichen, werden die Fahrzeuge in weiterer Folge auf die durchschnittliche Breite sowie die durchschnittliche Länge aller Fahrzeuge vereinheitlicht. Die durchschnittliche Länge beträgt 4,26 m („length of mean car“) und die durchschnittliche Breite 1,74 m („width of mean car“). Betrachtet man die Eckpunkte im x', y' -Koordinatensystem in Abbildung 5-4,

ergeben sich die Werte in Tabelle 5-1. Das skalierte Fahrzeug wird in weiterer Folge als „mean car“ oder Durchschnittsfahrzeug bezeichnet.

Tabelle 5-1: Definition der Eckpunkte beim Durchschnittsfahrzeug

Definition der Eckpunkte beim Durchschnittsfahrzeug				
	i	$x'_{\text{mean car},i}$	$y'_{\text{mean car},i}$	$\alpha_{\text{mean car},i}$
Vorne links	1	2,13 m	0,87 m	22,2 °
Vorne rechts	2	2,13 m	-0,87 m	-22,2 °
Hinten links	3	-2,13 m	0,87 m	157,8 °
Hinten rechts	4	-2,13 m	-0,87 m	-157,8 °

Für die Umrechnung der Fahrzeuge auf das Durchschnittsfahrzeug wird die Breite und Länge des Fahrzeugs des lokalen Fahrzeugkoordinatensystems auf die durchschnittliche Länge und Breite skaliert. Dies erfolgt durch die Multiplikation der x' und y' Koordinaten der Fahrzeugeckpunkte mit den jeweiligen Längenverhältnissen. Die Berechnung der neuen Koordinaten der Eckpunkte ist in Formel 5-3 und Formel 5-4 ersichtlich, i steht für den jeweiligen Eckpunkt nach Tabelle 5-1.

$$x'_{\text{mean car},i} = x'_i * \frac{\text{length of mean car}}{\text{length of car}} \quad \text{Formel 5-3: Berechnung der neuen x-Koordinate}$$

$$y'_{\text{mean car},i} = y'_i * \frac{\text{width of mean car}}{\text{width of car}} \quad \text{Formel 5-4: Berechnung der neuen y-Koordinate}$$

In weiterer Folge werden auch der FPOC und die Punkte des zweiten Fahrzeugs skaliert. Die Skalierung des zweiten Fahrzeugs entlang der Hauptachsen des lokalen Fahrzeugkoordinatensystems hat zur Folge, dass das zweite Fahrzeug zu einem nicht rechteckigen Fahrzeug verzerrt wird, da es nicht entlang dessen eigenen Achsen skaliert wird. Je kleiner die Abweichung der Länge und Breite des Fahrzeugs des lokalen Koordinatensystems zum Durchschnittsfahrzeug ist und je kleiner die Abweichung der Achsen beider Fahrzeugkoordinatensysteme zueinander ist, desto geringer fällt diese Verzerrung aus.

Durch diese Vereinheitlichung der Größe der Fahrzeuge im lokalen Fahrzeugkoordinatensystem können alle Unfälle im Fahrzeugkoordinatensystem des Fahrzeugs A oder des Fahrzeugs B überlagert werden und in einer Gesamtansicht dargestellt werden. Abbildung 5-5 stellt beispielhaft diese Darstellungsvariante dar. In der Mitte befindet sich immer das Fahrzeug A und in Gelb sind in diesem Fall 24 Unfallvarianten von Fahrzeug B eingezeichnet, zusätzlich sind die FPOC als rote Punkte markiert.

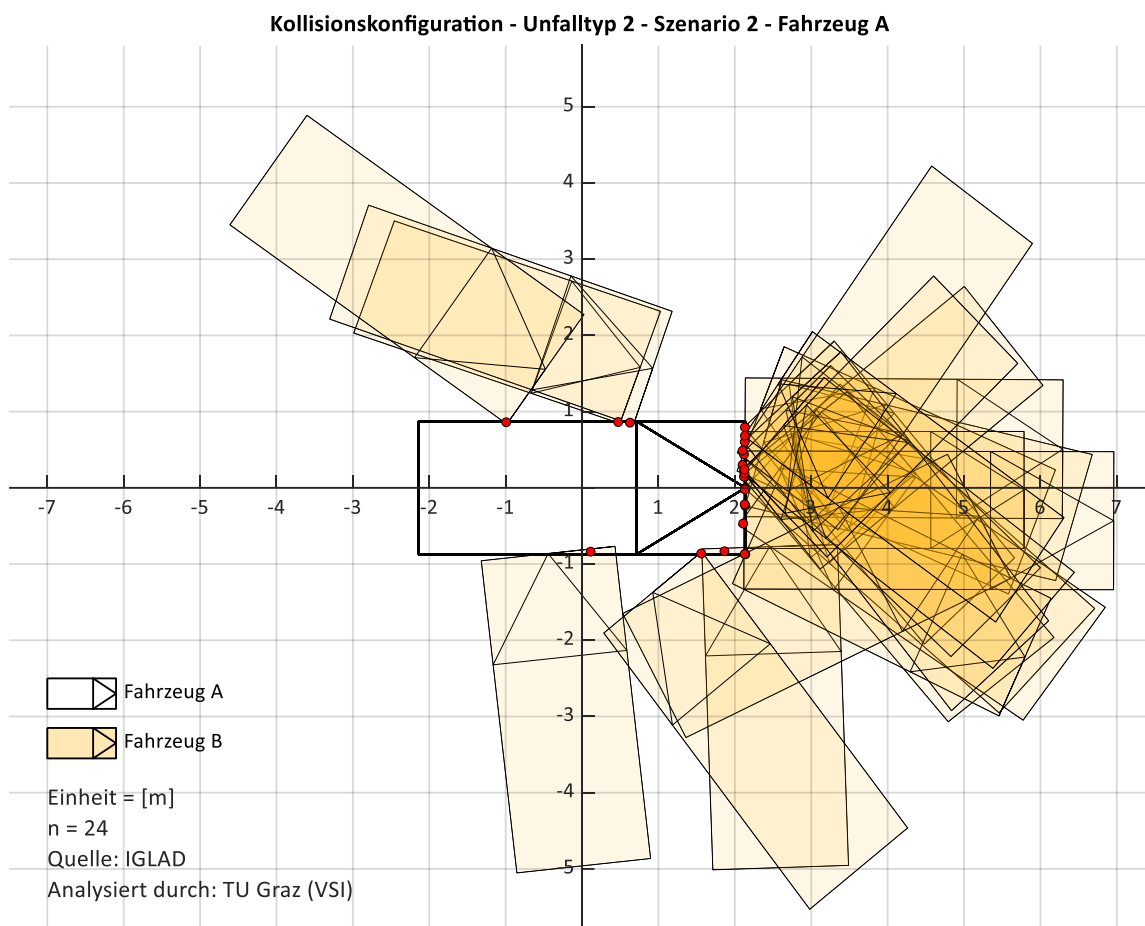


Abbildung 5-5: Beispiel zur Darstellung der Kollisionskonfiguration

Ein Nachteil der Darstellungsform als Durchschnittsfahrzeug ist, dass für die Seiten des Fahrzeugs ein größerer Winkelbereich von jeweils $135,6^\circ$ und ein Winkelbereich von jeweils $44,4^\circ$ für die Vorder- und Rückseite des Fahrzeugs zwischen den Eckpunkten resultiert. Daher wird bei einer Darstellung in Abhängigkeit des Winkels der seitliche Bereich viel größer als die Vorder- und Rückseite dargestellt. Um eine einheitlichere Darstellung zu erhalten muss das Verhältnis zwischen Länge und Breite 1 betragen. Daher wird in der nachfolgenden Darstellungsform das Ausgangsfahrzeug analog zum Durchschnittsauto mit einer Fahrzeuglänge und Fahrzeugbreite von jeweils 1 umgerechnet. Durch die gleiche Länge und Breite des Fahrzeugs beträgt der Abstand der einzelnen Eckpunkte jeweils 90° zueinander. Somit ist eine gleichmäßige Darstellung möglich, da nun sowohl die Längsseiten des Fahrzeugs als auch die Vorder- und Rückseite des Fahrzeugs durch einen Winkelbereich von jeweils 90° abgedeckt werden. Diese Darstellungsform wird in weiterer Folge als Einheitsfahrzeug oder auch „unit square car“ bezeichnet, siehe Tabelle 5-2.

Tabelle 5-2: Eckpunkte beim Einheitsfahrzeug

Definition der Eckpunkte beim Einheitsfahrzeug				
	i	$x'_{\text{unit square car},i}$	$y'_{\text{unit square car},i}$	$\alpha_{\text{unit square car},i}$
Vorne links	1	0,5 m	0,5 m	45 °
Vorne rechts	2	0,5 m	-0,5 m	-45 °
Hinten links	3	-0,5 m	0,5 m	135 °
Hinten rechts	4	-0,5 m	-0,5 m	-135 °

Für den Vergleich zwischen der Baseline und der Treatment-Simulation wird eine Darstellungsform gewählt, bei welcher der Winkel des Einheitsfahrzeugs der Baseline an der Abszisse und der Winkel des Einheitsfahrzeugs der Treatment-Simulation auf der Ordinate aufgetragen werden, siehe Abbildung 5-6. Zusätzlich wird über die Färbung des Punktes die Änderung des OYA dargestellt.

Befindet sich der Punkt entlang der grau-unterbrochenen Linie ist der CA der Baseline ident mit der Treatment-Simulation, was bedeutet, dass es keine Änderung des CA gegeben hat. Je weiter der Punkt von dieser Linie abweicht, desto stärker ist auch die Änderung des OYA. Dieser Zusammenhang wird in Abbildung 5-6 und Tabelle 5-3 anhand von zwei Beispielen erläutert. Bei dem violetten Punkt findet keine Änderung des Kollisionswinkels gegenüber der Baseline statt. Der Winkel beträgt in beiden Fällen -90°. Bei dem grünen Punkt bewirkt das Treatment eine Verlagerung des FPOC von der Mitte der rechten Fahrzeugseite (-90°) zum linken vorderen Eckpunkt (45°) des Fahrzeuges.

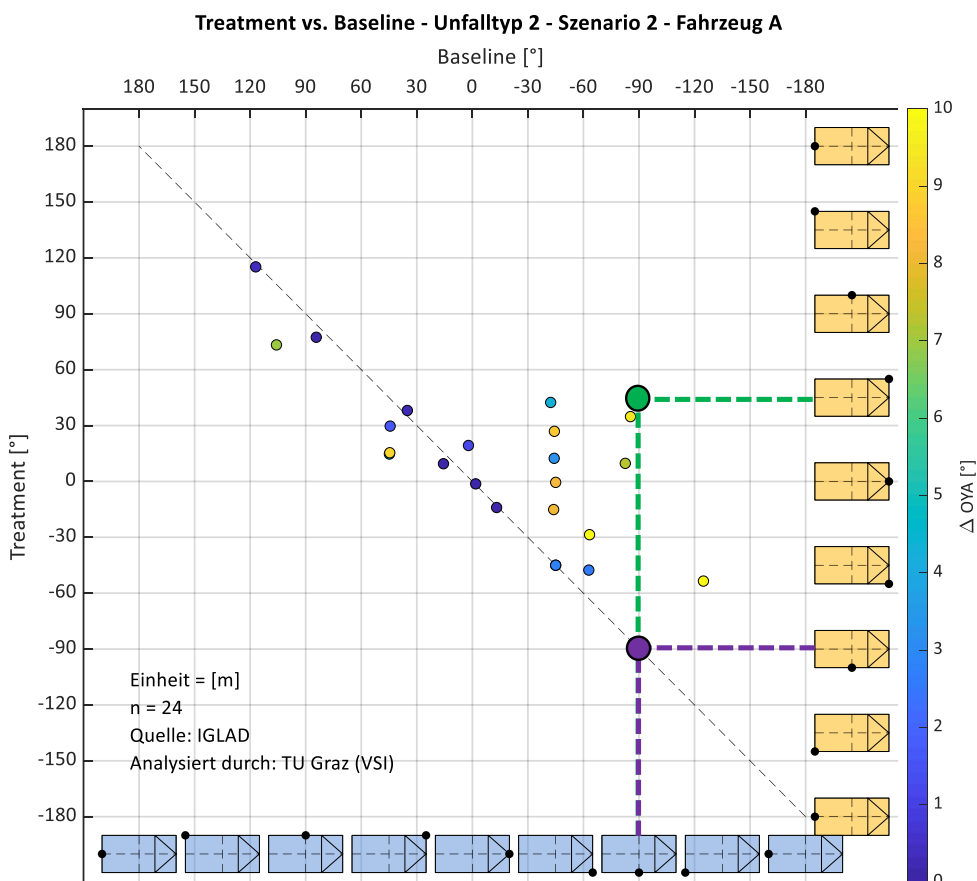


Abbildung 5-6: Beispiele für die Änderung des CA aufgrund der Eingriffsstrategie

Tabelle 5-3: Auswirkung der Eingriffsstrategie auf den FPOC


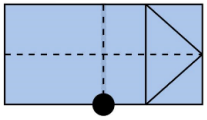
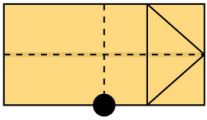

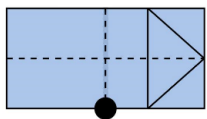
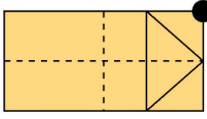
Auswirkung der Eingriffsstrategie auf den FPOC			
	Baseline		Treatment
		→	
		→	

Abbildung 5-7 stellt die beiden genannten Darstellungsvarianten mit den dazugehörigen Abmessungen gegenüber. Aus dem Ausgangsfahrzeug im lokalen Fahrzeugkoordinatensystem kann sowohl das Durchschnittsfahrzeug als auch das Einheitsfahrzeug abgeleitet werden. Der CA und der OYA beziehen sich aus den zuvor genannten Gründen der gleichmäßigen Darstellung in weiterer Folge auf das Einheitsfahrzeug. Ein Beispiel dafür ist Abbildung 5-6. Für die Darstellung der Kollisionskonfiguration nach Abbildung 5-5 wird in weiterer Folge das Durchschnittsfahrzeug herangezogen, da dort die Verzerrung gegenüber dem Ausgangsfahrzeug am geringsten ist.

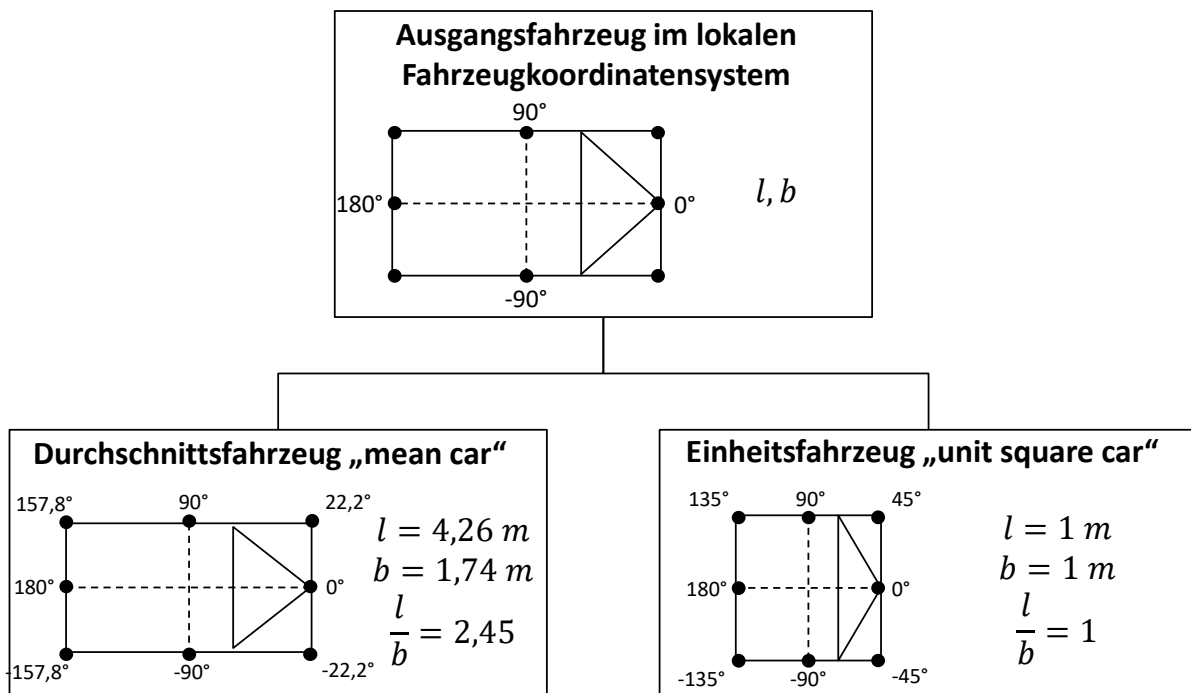


Abbildung 5-7: Verzerrung des Ausgangsfahrzeug als Durchschnitts- oder Einheitsfahrzeug

Auswertung

Um eine Aussage zu erhalten, auf welcher Fahrzeugseite der FPOC stattgefunden hat, werden beide Fahrzeuge jeweils auf die Vorderseite, Rückseite, linke Seite und rechte Seite aufgeteilt. Der Übergang wird durch den Winkel der Eckpunkte definiert. Je nachdem ob das Einheitsfahrzeug oder das Durchschnittsfahrzeug betrachtet wird, gilt folgende Definition:

Tabelle 5-4: Definition der Eckpunkte in Abhängigkeit der Verzerrung des Fahrzeugs

Definition der Eckpunkte beim Durchschnitts- und beim Einheitsfahrzeug							
	i	$x'_{\text{mean car},i}$	$y'_{\text{mean car},i}$	$\alpha_{\text{mean car},i}$	$x'_{\text{unit square car},i}$	$y'_{\text{unit square car},i}$	$\alpha_{\text{unit square car},i}$
Vorne links	1	2,13 m	0,87 m	22,2 °	0,5 m	0,5 m	45 °
Vorne rechts	2	2,13 m	-0,87 m	-22,2 °	0,5 m	-0,5 m	-45 °
Hinten links	3	-2,13 m	0,87 m	157,8 °	-0,5 m	0,5 m	135 °
Hinten rechts	4	-2,13 m	-0,87 m	-157,8 °	-0,5 m	-0,5 m	-135 °

Für die Unterscheidung der Fahrzeugseiten folgt:

$$\text{Vorderseite: } \alpha_2 \leq \alpha \leq \alpha_1$$

$$\text{Linke Seite: } \alpha_1 < \alpha \leq \alpha_3$$

$$\text{Rechte Seite: } \alpha_4 \leq \alpha < \alpha_2$$

$$\text{Rückseite: } \alpha_3 < \alpha < 180^\circ \vee -180^\circ < \alpha < \alpha_4$$

6 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Arbeit betrachtet. Im ersten Schritt wird ein allgemeiner Gesamtüberblick über alle Simulationen gegeben und in weiterer Folge wird als Beispiel für die Auswertung nach Unfalltypen das Szenario 2 des Unfalltyps 3, also Einbiege- und Kreuzungsunfälle, näher betrachtet. Die gesamte Auswertung ist zusammengefasst im Anhang B zu finden.

6.1 Stichprobenumfang nach der Plausibilisierung

Im Zuge der Unfallrekonstruktion sowie der Vorwärtssimulation werden Unfälle aus der Betrachtung ausgeschlossen sofern die verfügbaren Daten nicht ausreichend sind, nicht plausibel sind, der Unfall nicht zwischen zwei Personenkraftwagen stattfindet oder die Beschleunigungsgrenzwerte nach Kapitel 4.5 überschritten werden. Von den ursprünglichen 295 Unfällen verbleiben durch die genannten Ausschlusskriterien 127 Unfälle, das entspricht 43% der Ausgangslage.

Betrachtet man die verbleibenden Unfälle nach Herkunftsland ergibt sich, dass mehr als zwei Drittel der Unfälle aus Deutschland stammen, siehe Abbildung 5-6. Genauer betrachtet sind 73% der Fälle aus Deutschland, 14% aus Frankreich, 9% aus Tschechien und jeweils 2% aus Österreich und Italien.

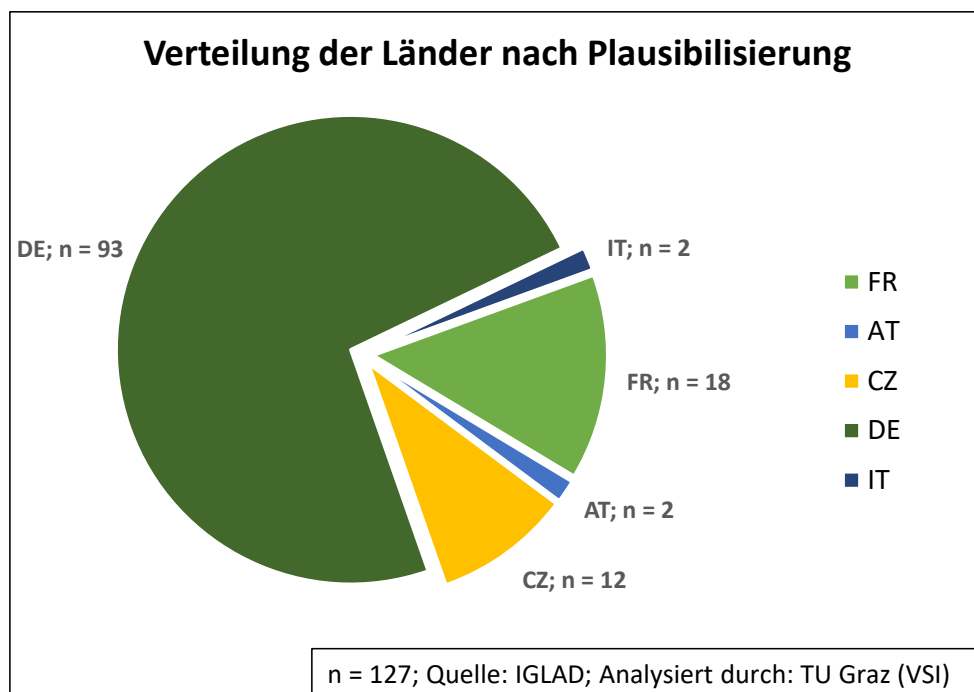


Abbildung 6-1: Verteilung der Länder nach Plausibilisierung

Tabelle 6-1 vergleicht die Länderverteilung der Ausgangslage mit der Verteilung nach der Simulation. Die Länder sind nach dem prozentuellen Anteil der verbleibenden Fälle gegenüber der Ausgangslage sortiert. Es ist zu erkennen, dass 64% der Fälle von Deutschland verbleiben und dieses die höchste

Ergebnisse und Diskussion

Quote der verbleibenden Fälle vorweist. Hingegen ist von 21 schwedischen Fällen keiner für die Auswertung geeignet. Auch bei den italienischen Fällen ist mit 5% nur ein geringer Anteil der Fälle für die Auswertung nach der Simulation verwendbar.

Tabelle 6-1: Vergleich der Länderverteilung mit der Ausgangslage nach Plausibilisierung

Vergleich der Verteilung nach Länder				
Land	Nach Datenfilter	Nach Plausibilisierung	Differenz	Verbleibend
Deutschland	145	93	-52	64%
Frankreich	45	18	-27	40%
Tschechien	32	12	-20	38%
Österreich	15	2	-13	13%
Italien	37	2	-35	5%
Schweden	21	0	-21	0%
Gesamt	295	127	-168	43%

Abbildung 6-2 stellt die verbleibenden Fälle bezogen auf die Unterkategorie der Unfalltypen dar. Die blauen Balken repräsentieren die Stichprobengröße der Ausgangslage (analog zu Abbildung 3-5) und die grünen Balken die Unfälle nach der Plausibilisierung. Die Anzahl der für die Auswertung zur Verfügung stehenden Unfälle nimmt nicht nur je nach Ursprungsland, sondern auch je nach Unfalltyp unterschiedlich ab. Unfälle des Unfalltyps 6 weisen eine höhere Verwendbarkeit als die der restlichen Unfallkategorien auf. Von den 127 verbleibenden Unfällen sind 34 Unfälle vom Unfalltyp 2 (Abbiege-Unfall), 28 Unfälle vom Unfalltyp 3 (Einbiegen/Kreuzen-Unfall) und 52 Unfälle vom Unfalltyp 6 (Unfall im Längsverkehr).

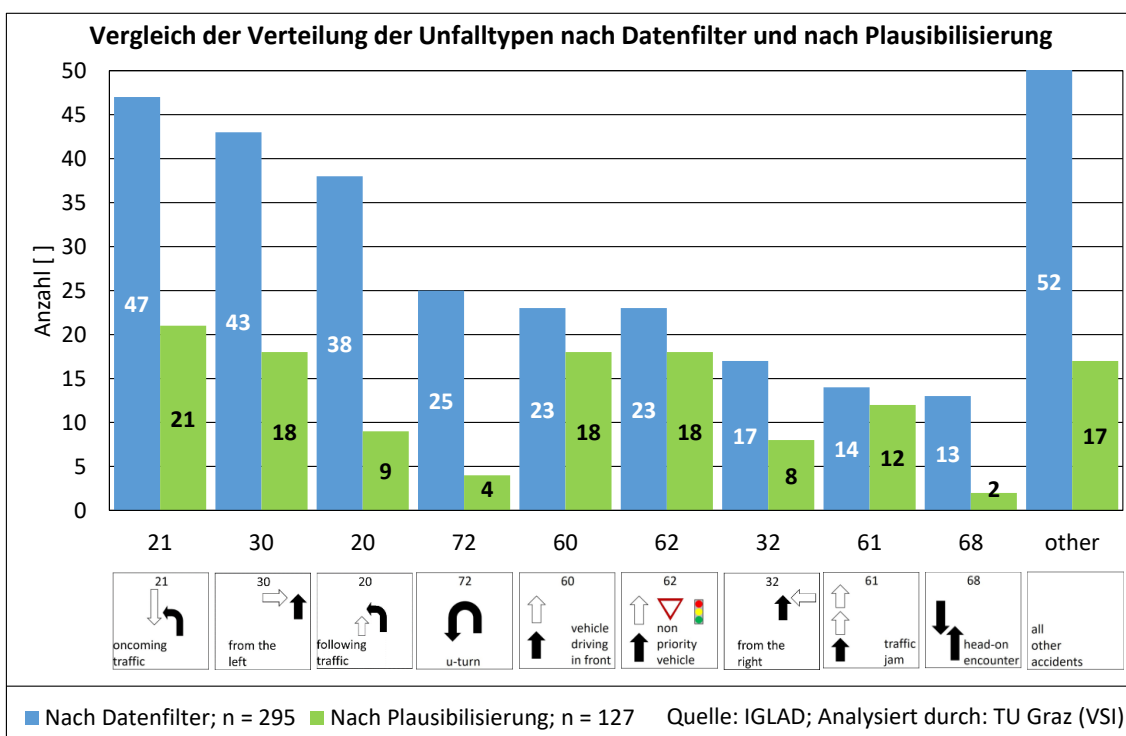


Abbildung 6-2: Vergleich der Verteilung der Unfalltypen nach Datenfilter und nach Plausibilisierung

6.2 Gesamtauswertung der Unfälle

In diesem Abschnitt werden die Simulationsergebnisse aller Unfälle beurteilt. Bei den Ergebnissen wird zwischen keinem Eingriff („no intervention“), Minderung („Mitigation“) und Vermeidbarkeit („Avoidance“) unterschieden. Minderung bedeutet, dass sich die Kollisionsgeschwindigkeit durch die Notbremsfunktion verringert. Die Minderung bezieht sich daher rein auf die Kollisionsgeschwindigkeit und gibt keine gesicherte Aussage darüber, ob sich dadurch auch die Unfallschwere verringert. Für die Auswertung werden die vier Szenarien, welche in Tabelle 4-2 angeführt sind, betrachtet.

In Abbildung 6-3 ist eine Übersicht der Vermeidbarkeit in Abhängigkeit der verschiedenen Szenarien dargestellt. Bei Szenario 1, welches der Baseline entspricht, ist keines der Fahrzeuge mit einer Notbremsfunktion ausgestattet. Sofern nur einer der beiden Beteiligten mit einer Notbremsfunktion ausgestattet ist, zeigt sich, dass das Ausrüsten des Unfallverursachers (Szenario 2) eine doppelt so hohe Vermeidbarkeit der Unfälle zur Folge hat, als bei der Ausrüstung des nicht unfallverursachenden Unfallbeteiligten (Szenario 3). Auffällig ist auch, dass bei Szenario 3 nur in 50% der Unfälle ein Eingriff der Notbremsfunktion erfolgt. Der Grund liegt darin, dass die Unfalltypen 60, 62 und 61 zirka 38% der betrachteten Unfälle darstellen. In diesen Szenarien handelt es sich um Auffahrkollisionen bei welchen die Notbremsfunktion des Vorfahrenden situationsbedingt nicht unfallmindernd eingreifen kann. Das beste Ergebnis liefert das Szenario 4, bei welchem in allen Fällen zumindest eine Minderung und zu 61% eine Vermeidbarkeit stattfindet.

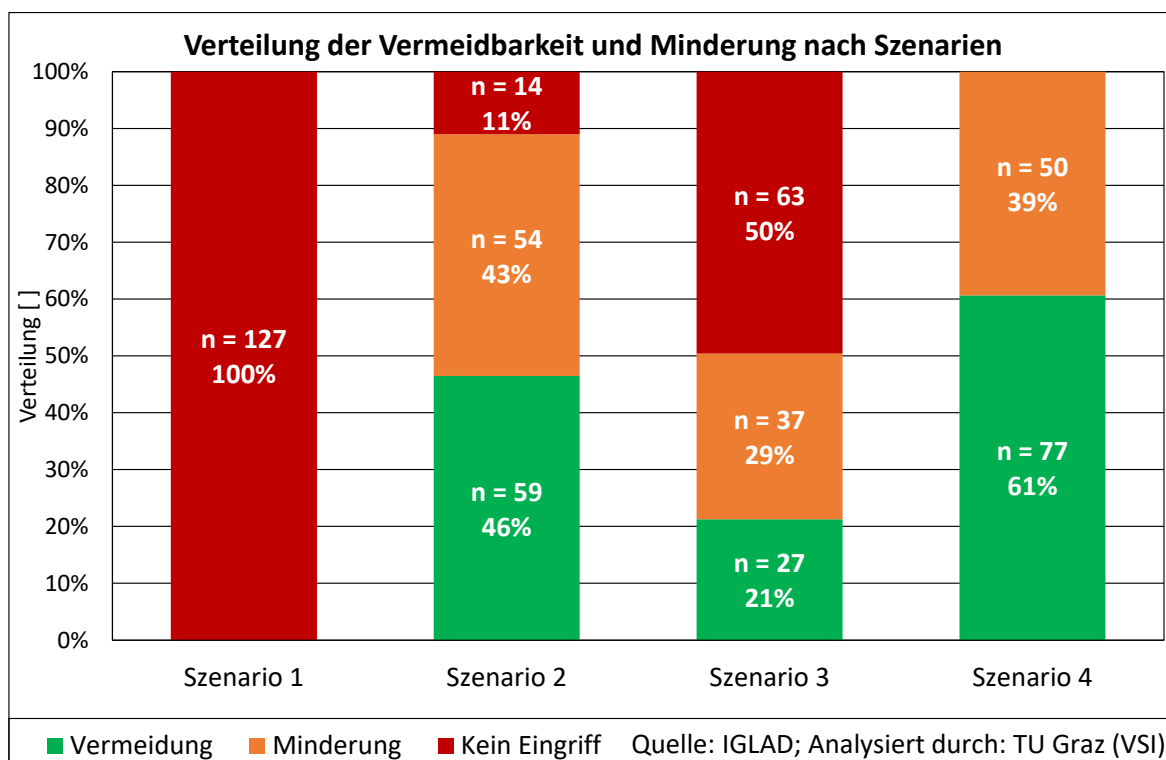


Abbildung 6-3: Minderung und Vermeidbarkeit nach Szenarien

6.2.1 Vermeidbarkeit nach Hauptkategorie der Unfalltypen

Abbildung 6-4 stellt die Gesamtauswertung der Vermeidbarkeit und Minderung nach den Hauptkategorien dar. Bei den Unfalltypen 2 und 3 schneidet Szenario 3 besser ab als Szenario 2. Bezogen auf alle Unfälle ist bei Szenario 3 die Vermeidbarkeit bei Unfalltyp 2 um 6% und bei Unfalltyp 3 um 10% größer als bei Szenario 2. Bei Unfalltyp 6 ist im Szenario 3 kein einziger Unfall vermeidbar gewesen und nur 6% der Fälle werden gemindert. Die Ursache dafür liegt, wie bereits erwähnt, an den Auffahrunfällen. Bei Szenario 4 ist die Vermeidbarkeit bei allen drei Unfalltypen mit durchschnittlich 59% ungefähr gleich hoch.

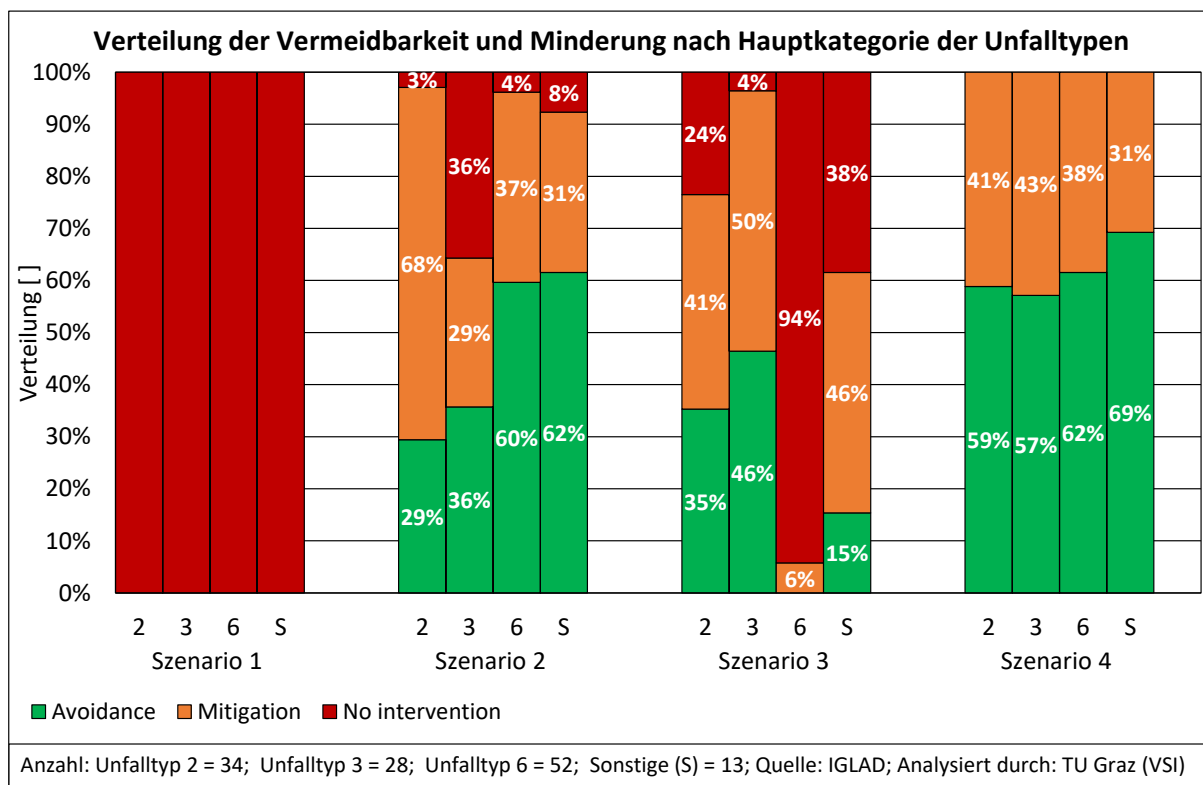


Abbildung 6-4: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen-Hauptkategorie

6.2.2 Vermeidbarkeit nach Unterkategorie der Unfalltypen

Betrachtet man die Vermeidbarkeit und Minderung bezogen auf die zweistelligen Unfalltypen ist bei Szenario 2 bei allen Unfalltypen eine Minderung und Vermeidbarkeit gegeben, siehe Abbildung 6-5. Bei Unfalltyp 30, das entspricht einem Abbiegeunfall bei dem der Unfallgegner von links kommt, ist auffallend, dass bei 50% der Fälle kein Eingriff stattfindet. Die Anzahl an Unfällen ohne Eingriff ist somit deutlich höher als bei den anderen Unfalltypen. Auffällig ist auch die hohe Vermeidbarkeit bei Unfalltyp 60 mit 78%.

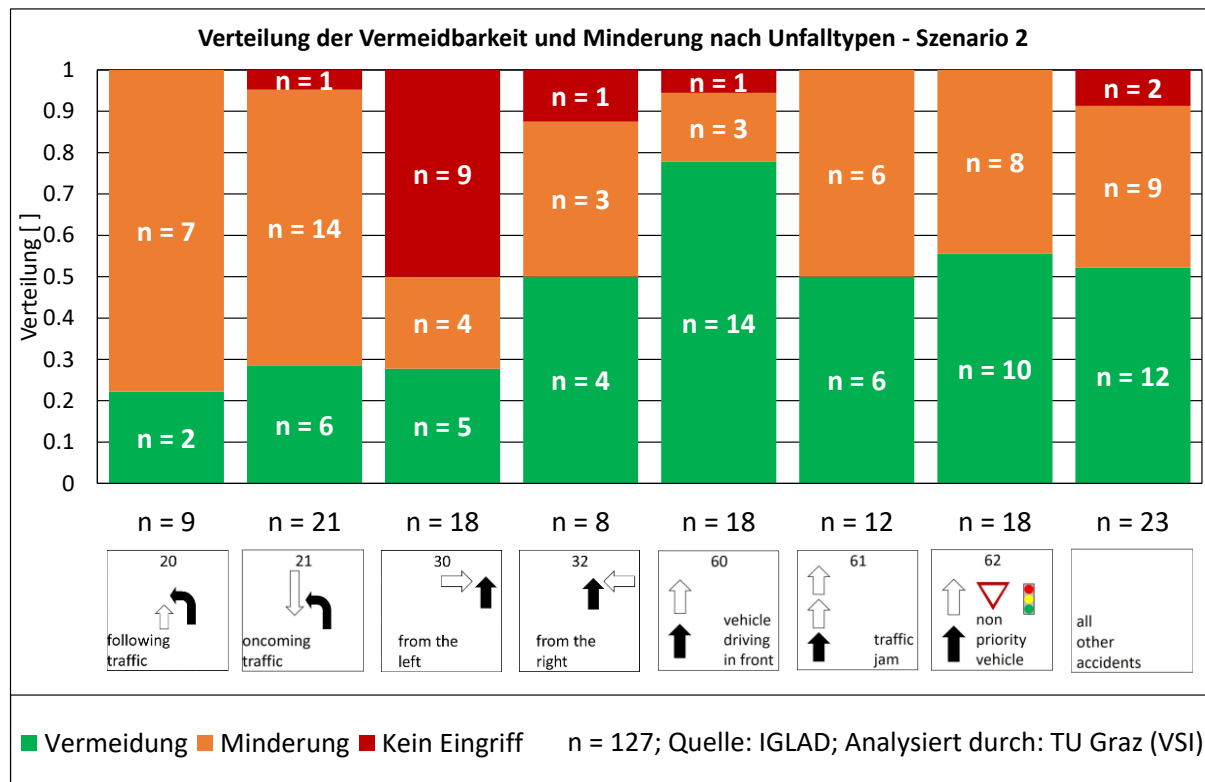


Abbildung 6-5: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen-Unterkategorie - Szenario 2

Bei Szenario 3 ist auffällig, dass die Minderung und Vermeidbarkeit je nach Unfalltyp variiert, siehe Abbildung 6-6. Aufgrund der gewählten Eingriffsstrategie gibt es bei den Auffahrunfällen, das entspricht den Unfalltypen 60, 61 und 62, keinen Eingriff. Die größte Wirkung kann bei Unfalltyp 21 (Abbiege-Unfall mit Gegenverkehr) sowie 30 und 32 (Einbiegen/Kreuzen-Unfälle von links und rechts) festgestellt werden. Die Eingriffsstrategie weist bei Unfalltyp 30 eine deutlich höhere Vermeidbarkeit und Minderung auf als bei Szenario 2.

Bei Szenario 4 gibt es außer bei Typ 20 (Abbiege-Unfall mit Nachfolgenden) eine Vermeidbarkeit von etwa 50%, siehe Abbildung 6-7. Die Vermeidbarkeit ist bei Unfalltyp 20 am geringsten und bei Unfalltyp 60 am höchsten.

Ergebnisse und Diskussion

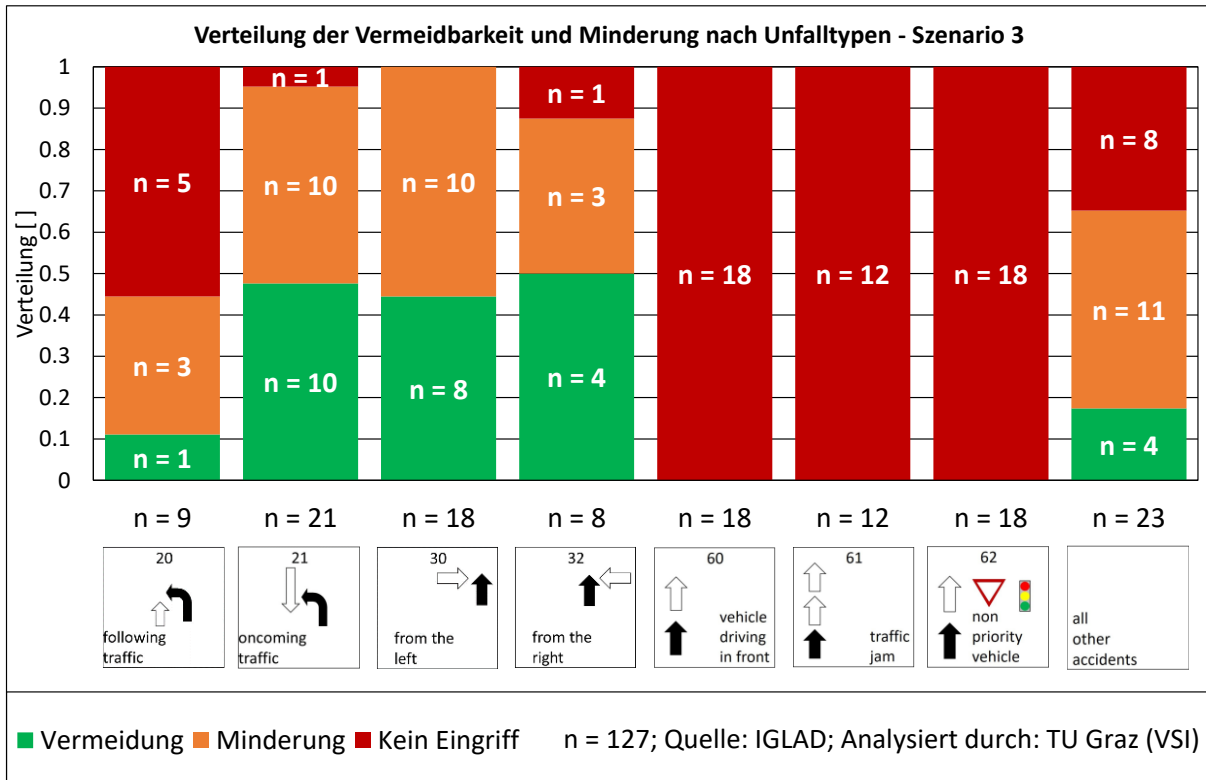


Abbildung 6-6: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen-Unterkategorie - Szenario 3

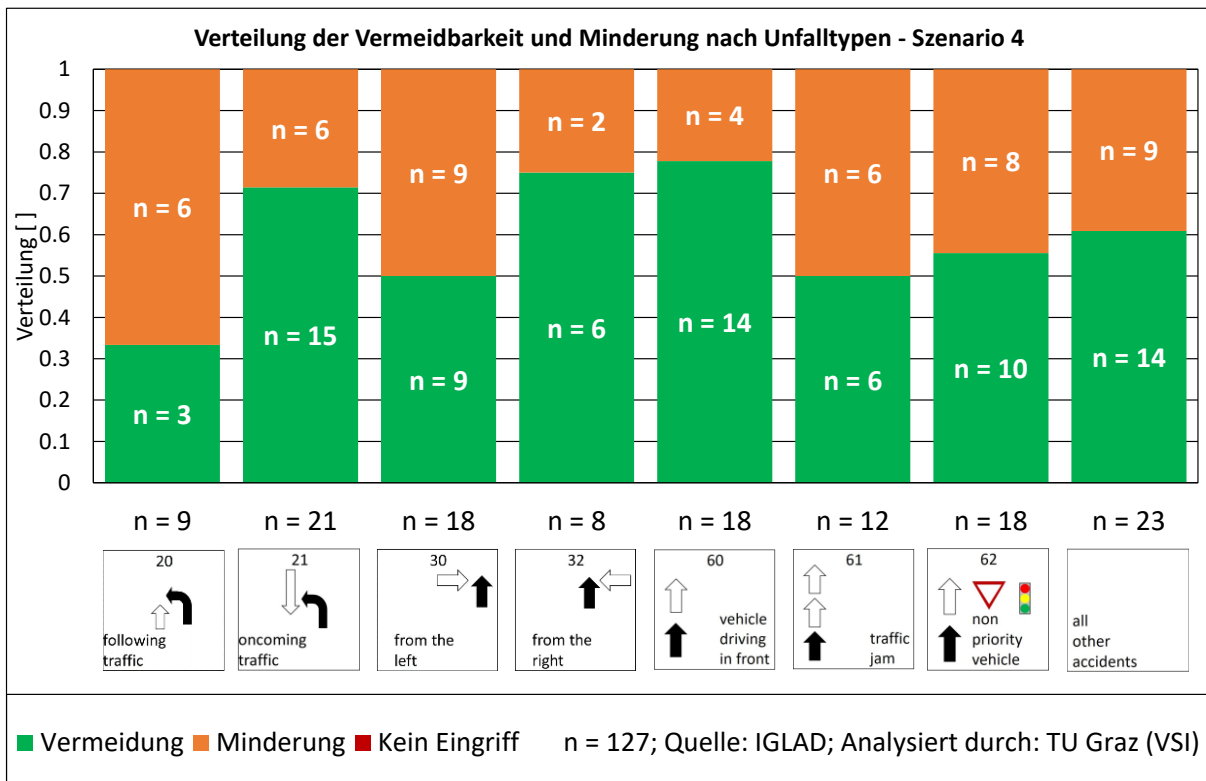


Abbildung 6-7: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen-Unterkategorie - Szenario 4

6.2.3 Kollisionsgeschwindigkeit

Zur Analyse der Kollisionsgeschwindigkeit werden nur die nicht vermeidbaren Unfälle herangezogen. Für das Szenario 2 sind das 68 Unfälle, für das Szenario 3 100 Unfälle und für das Szenario 4 50 Unfälle. In weiterer Folge werden für jedes einzelne Treatment-Szenario die verbleibenden Unfälle mit den dazugehörigen Unfällen der Ausgangslage aus der Baseline verglichen.

Abbildung 6-8 stellt die Änderung der Kollisionsgeschwindigkeit bei Szenario 2 dar. Für das Fahrzeug A ergibt sich eine Reduktion des Mittelwerts sowie des Median gegenüber der Baseline. Der Mittelwert hat sich von 27 km/h (SD = 14) auf 13,8 km/h (SD = 12,2) verringert, siehe Tabelle 6-2. Bei Fahrzeug B gibt es keine signifikante Änderung der Kollisionsgeschwindigkeit.

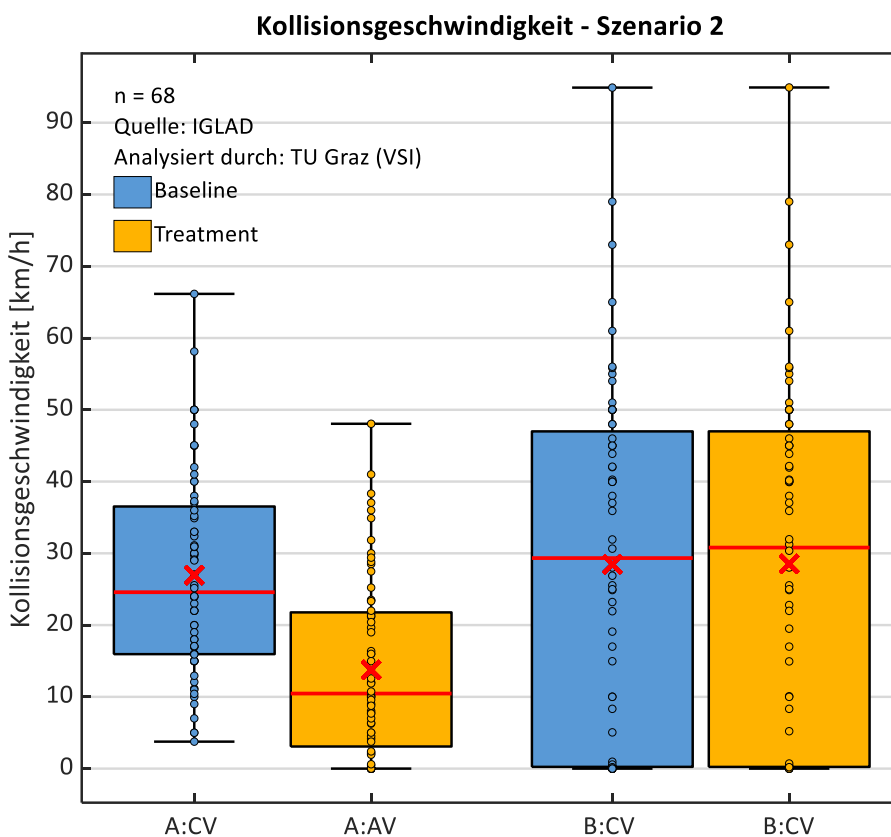


Abbildung 6-8: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 2

Tabelle 6-2: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 2

Kollisionsgeschwindigkeit - Szenario 2				
	A:BL	A:AV	B:BL	B:CV
Number n []	68	68	68	68
Median [km/h]	24,6	10,5	29,3	30,8
Mean Value [km/h]	27,0	13,8	28,5	28,5
Standard deviation [km/h]	14,0	12,2	24,0	24,0
Variance [(km/h)^2]	195,0	149,8	576,4	576,5
Minimum [km/h]	3,8	0,0	0,0	0,0
Maximum [km/h]	66,2	48,1	94,9	94,9

Ergebnisse und Diskussion

Bei Szenario 3 liegt die Kollisionsgeschwindigkeit von Fahrzeug B bei 50% der Unfälle unter 1,2 km/h in der Baseline, siehe Median des Fahrzeugs B in Tabelle 6-3. Aus Abbildung 6-9 folgt, dass bei Fahrzeug B der Mittelwert und der Median sowohl in der Baseline als auch beim Treatment voneinander abweichen. Der Mittelwert ändert sich von 17,9 km/h (SD = 23,5) auf 11,3 km/h (SD = 15,7 km/h) und der Median von 1,2 km/h auf 0,4 km/h. Das Fahrzeug B weist somit eine Verringerung des Mittelwerts auf. Zusätzlich zum Mittelwert ist auch eine Abnahme des 75%-Perzentil ersichtlich. Für das Fahrzeug A ist bei diesem Szenario keine signifikante Änderung der Kollisionsgeschwindigkeit gegeben.

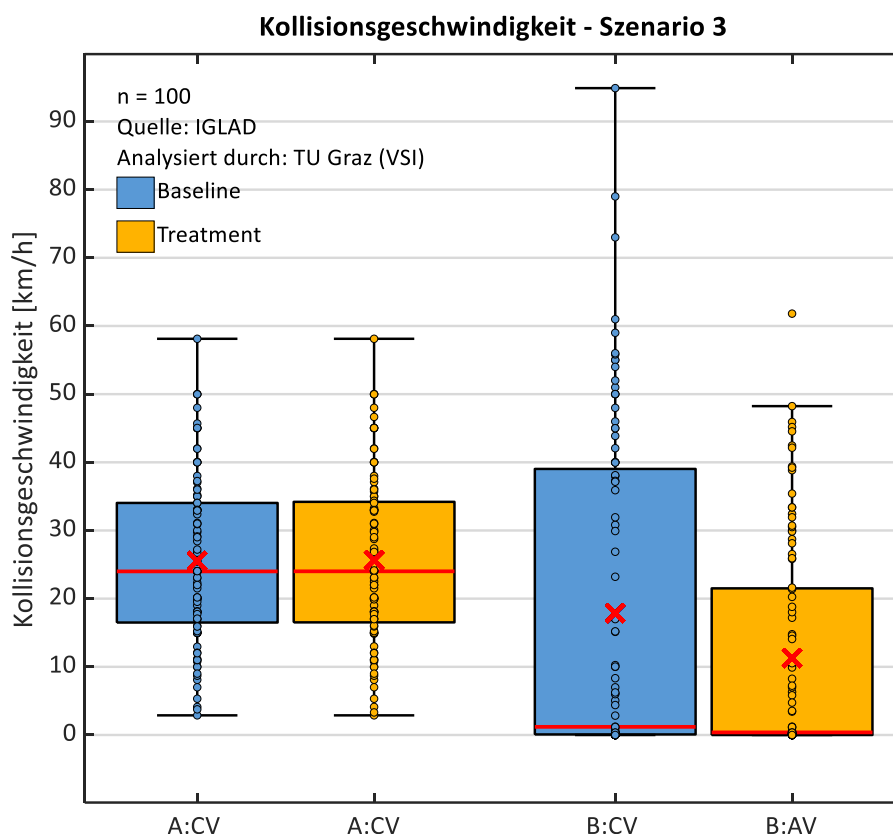


Abbildung 6-9: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 3

Tabelle 6-3: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 3

Kollisionsgeschwindigkeit - Szenario 3				
	A:BL	A:CV	B:BL	B:AV
Number n []	100	100	100	100
Median [km/h]	24,0	24,0	1,2	0,4
Mean Value [km/h]	25,5	25,6	17,9	11,3
Standard deviation [km/h]	12,3	12,3	23,5	15,7
Variance [(km/h) ²]	150,8	151,8	554,1	245,7
Minimum [km/h]	2,9	2,9	0,0	0,0
Maximum [km/h]	58,1	58,1	94,9	61,8

Abbildung 6-10 stellt die Änderung der Kollisionsgeschwindigkeit bei Szenario 4 dar. Für Fahrzeug A ist wie bei Szenario 2 eine deutliche Minderung des Mittelwerts sowie des Median ersichtlich. Der Mittelwert von Fahrzeug A ändert sich von 27,4 km/h (SD = 13,6) auf 14,4 km/h (SD = 11). Für das Fahrzeug B ist ebenso eine signifikante Änderung gegeben. Der Mittelwert von Fahrzeug B ändert sich von 26,8 km/h (SD = 26,9) auf 17,2 km/h (SD = 18,2), siehe Tabelle 6-4.

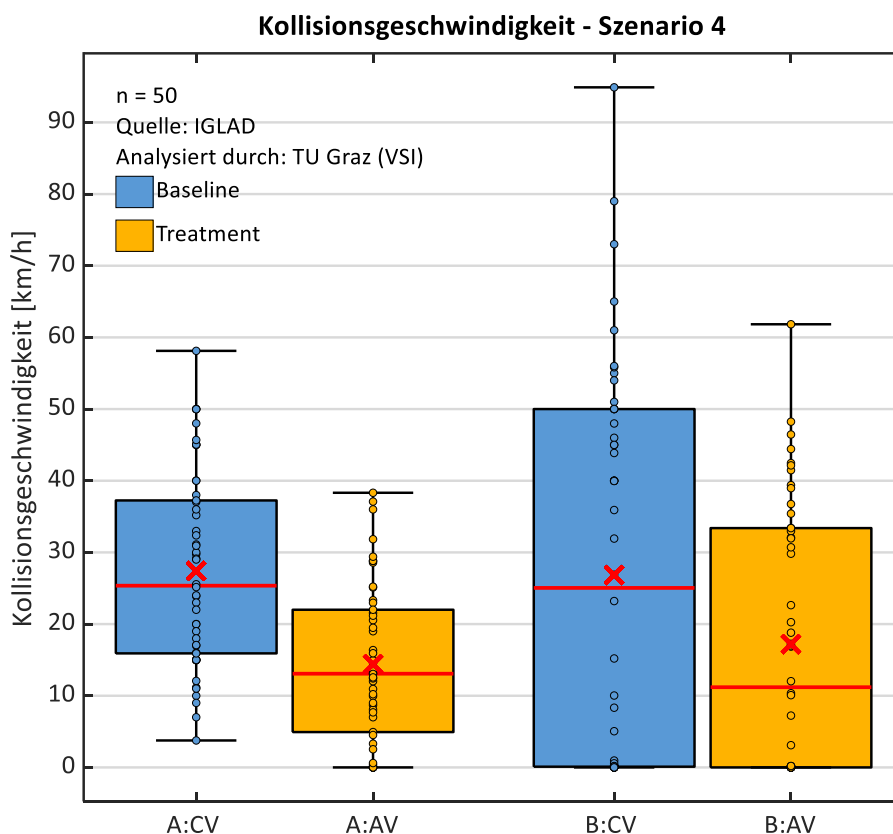


Abbildung 6-10: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 4

Tabelle 6-4: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 4

Kollisionsgeschwindigkeit - Szenario 4				
	A:BL	A:AV	B:BL	B:AV
Number n []	50	50	50	50
Median [km/h]	25,4	13,1	25,0	11,2
Mean Value [km/h]	27,4	14,4	26,8	17,2
Standard deviation [km/h]	13,6	11,0	26,9	18,2
Variance [(km/h)^2]	183,7	120,2	726,3	332,2
Minimum [km/h]	3,8	0,0	0,0	0,0
Maximum [km/h]	58,1	38,3	94,9	61,8

6.2.4 Delta-v

Für die Betrachtung des delta-v werden wie bei der Kollisionsgeschwindigkeit die nicht vermiedenen Unfälle herangezogen. Szenario 2 und Szenario 3 zeigen, dass sich die Änderung der

Kollisionsgeschwindigkeit hauptsächlich auf das Fahrzeug auswirkt, bei welchem das System aktiv ist. Bei der Kollisionsgeschwindigkeit ist nicht ersichtlich, wie sich das Treatment auf das andere Fahrzeug auswirkt. Dieser Zusammenhang ist bei der Betrachtung des delta-v deutlicher zu erkennen.

Bei Szenario 2 ist für beide Fahrzeuge eine signifikante Minderung des Mittelwerts sowie des Medianes erkennbar (Abbildung 6-11 und Tabelle 6-5). Bei Fahrzeug A ändert sich der Mittelwert von 18,9 km/h (SD = 10) auf 12,9 km/h (SD = 8,9). Bei Fahrzeug B ändert sich der Mittelwert von 19,7 km/h (SD = 9,8) auf 13,3 km/h (SD = 8).

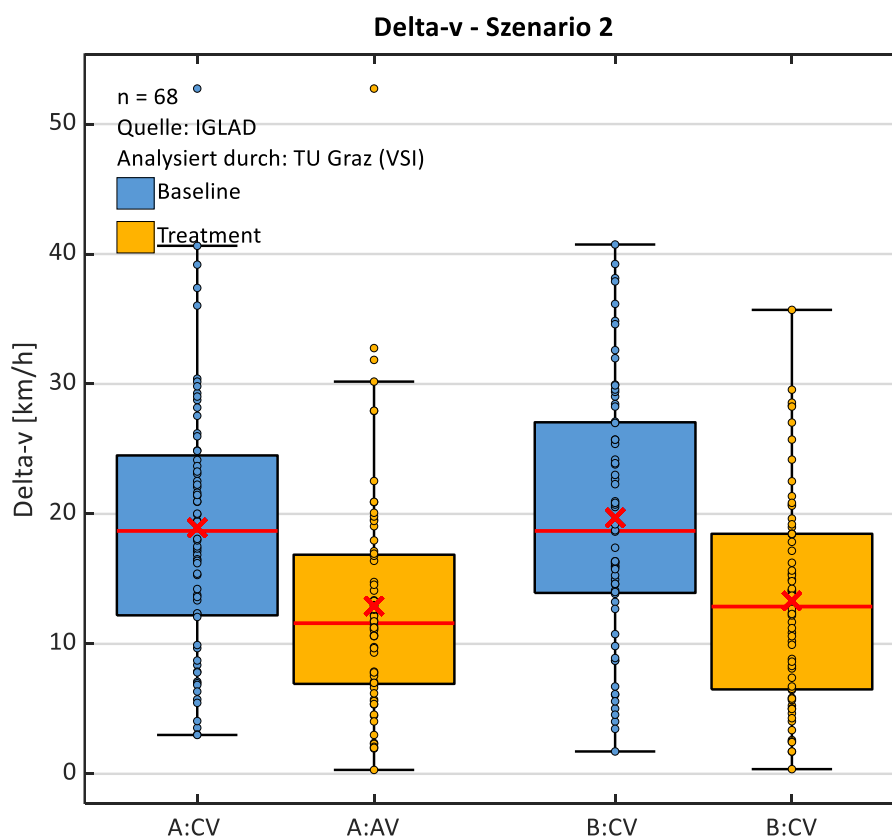


Abbildung 6-11: Box-Plot des delta-v – Szenario 2

Tabelle 6-5: Statistische Kennwerte des delta-v – Szenario 2

delta-v - Szenario 2				
	A:BL	A:AV	B:BL	B:CV
Number n []	68	68	68	68
Median [km/h]	18,7	11,6	18,7	12,9
Mean Value [km/h]	18,9	12,9	19,7	13,3
Standard deviation [km/h]	10,0	8,9	9,8	8,0
Variance [(km/h)^2]	99,4	78,6	95,9	64,0
Minimum [km/h]	3,0	0,3	1,7	0,4
Maximum [km/h]	52,7	52,7	40,7	35,7

Bei Szenario 3 ist die Änderung der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung deutlich geringer als bei Szenario 2, siehe Abbildung 6-12 und Tabelle 6-6. Die Ursache liegt wie bereits angesprochen an den Unfällen mit den Unfalltypen 60, 61 und 62. Bei Szenario 3 gibt es bei 50% der Unfälle keinen

Eingriff, siehe Abbildung 6-3. Trotzdem kann eine Tendenz zu einer Verringerung der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung bei beiden Fahrzeugen festgestellt werden. Bei Fahrzeug A ändert sich der Mittelwert von 16,5 km/h (SD = 9,8) auf 13,8 km/h (SD = 7,7). Bei Fahrzeug B ändert sich der Mittelwert von 16,9 km/h (SD = 8,9) auf 14,3 km/h (SD = 7,6).

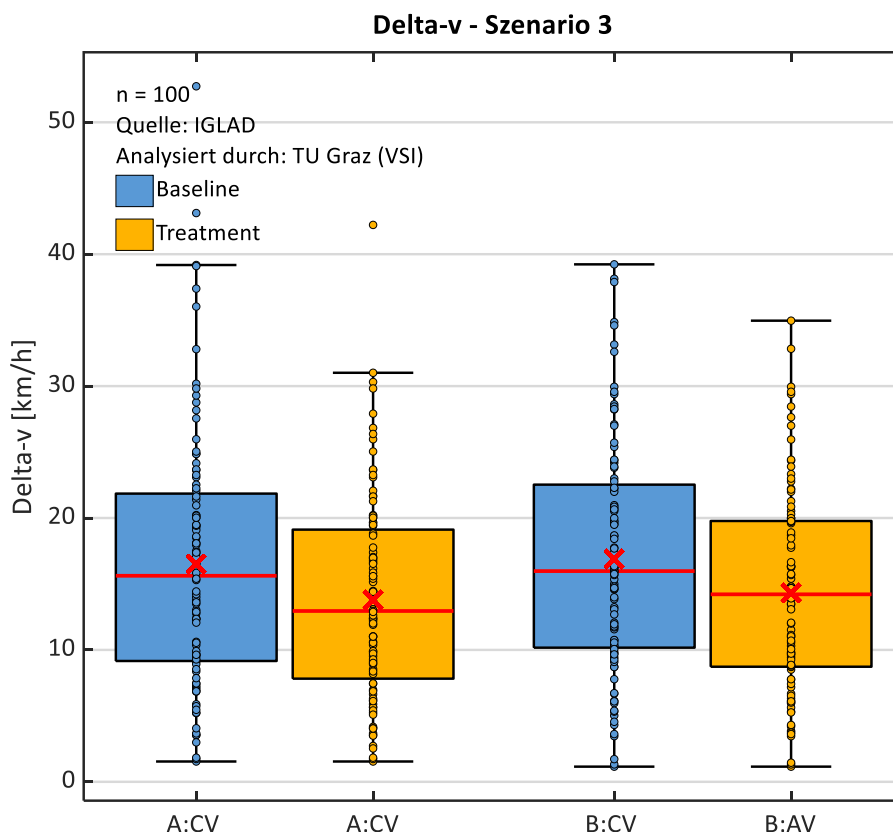


Abbildung 6-12: Box-Plot von delta-v – Szenario 3

Tabelle 6-6: Statistische Kennwerte von delta-v – Szenario 3

delta-v - Szenario 3				
	A:BL	A:CV	B:BL	B:AV
Number n []	100	100	100	100
Median [km/h]	15,6	13,0	16,0	14,2
Mean Value [km/h]	16,5	13,8	16,9	14,3
Standard deviation [km/h]	9,8	7,7	8,9	7,6
Variance [(km/h)^2]	96,3	59,8	79,1	58,4
Minimum [km/h]	1,5	1,5	1,2	1,2
Maximum [km/h]	52,7	42,2	39,2	35,0

Bei Szenario 4 ist die Änderung von delta-v durch die Notbremsfunktionen am größten, siehe Abbildung 6-13 und Tabelle 6-7. Bei Fahrzeug A ändert sich der Mittelwert von 18,6 km/h (SD = 10,1) auf 9,6 km/h (SD = 5,8). Bei Fahrzeug B ändert sich der Mittelwert von 19 km/h (SD = 9,5) auf 9,9 km/h (SD = 6,4).

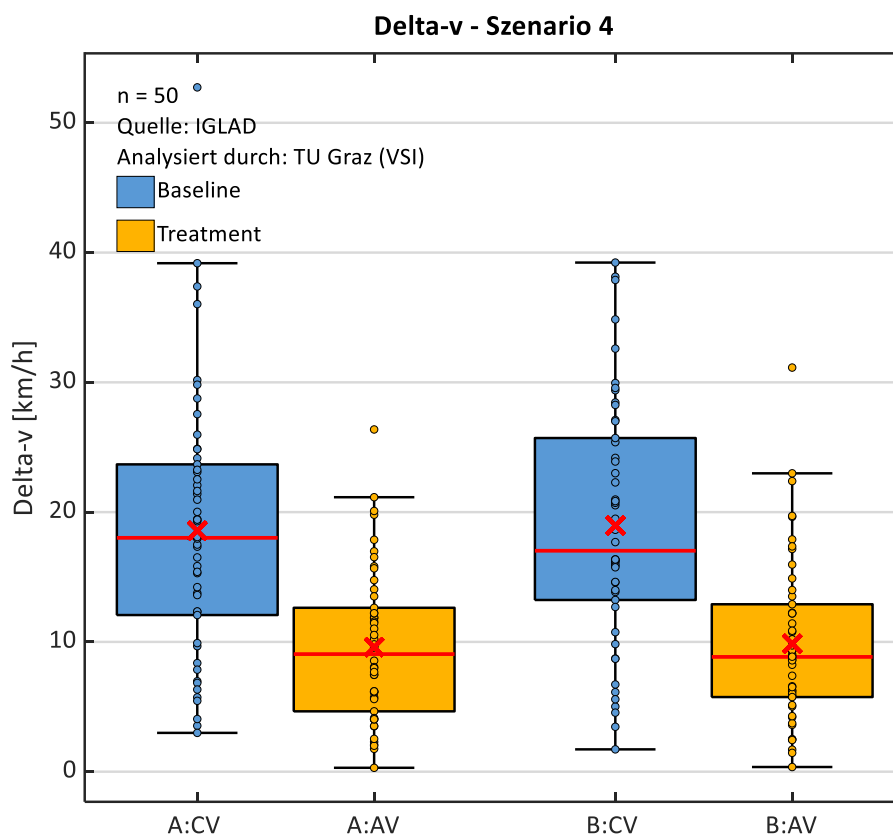


Abbildung 6-13: Box-Plot von delta-v – Szenario 4

Tabelle 6-7: Statistische Kennwerte von delta-v – Szenario 4

delta-v - Szenario 4				
	A:BL	A:AV	B:BL	B:AV
Number n []	50	50	50	50
Median [km/h]	18,0	9,1	17,0	8,8
Mean Value [km/h]	18,6	9,6	19,0	9,9
Standard deviation [km/h]	10,1	5,8	9,5	6,4
Variance [(km/h) ²]	102,4	34,0	90,3	40,3
Minimum [km/h]	3,0	0,3	1,7	0,4
Maximum [km/h]	52,7	26,4	39,2	31,1

6.2.5 Kollisionskonfiguration

In diesem Kapitel wird als Beispiel die Baseline mit dem Szenario 4 verglichen. Die restlichen Szenarien sind dem Anhang B zu entnehmen. Abbildung 6-14 stellt die Kollisionskonfiguration aller Unfälle der Baseline für das Fahrzeug A dar. Bei der Baseline handelt es sich bei 93 Kollisionen um Frontalkollisionen, das entspricht 73% aller Kollisionen dieser Arbeit. 18 Kollisionen fanden auf der linken Fahrzeugseite statt, diese Anzahl ist etwas größer verglichen mit der rechten Seite, welche 15 Kollisionen aufweist. Weitere Details zur Verteilung sind Tabelle 6-8 zu entnehmen. In der Tabelle werden alle Kollisionen der Baseline mit den verbleibenden Kollisionen der Treatment-Simulation (Szenario 4) gegenübergestellt.

Beim Vergleich beider Szenarien ist eine deutliche Verringerung der Anzahl an Kollisionen von 127 auf 50 Unfälle ersichtlich, siehe Abbildung 6-14 und Abbildung 6-15. Die Anzahl an Frontalkollisionen und Kollisionen auf der rechten Seite haben sich um etwa zwei Drittel verringert. Die Anzahl an Kollisionen auf der linken Fahrzeugseite haben sich mit zirka einem Drittel vermindert.

Betrachtet man die Unfalltypen-Unterkategorie für das Szenario 4, siehe Abbildung 6-7, zeigt sich bei den Einbiegen/Kreuzen-Unfällen die gleiche Tendenz. Die Vermeidbarkeit der Unfälle des Unfalltyps 32 (Fahrzeug B kommt von rechts) ist deutlich höher, als für die des Typs 30 (Fahrzeug B kommt von links).

Tabelle 6-8: Verteilung des FPOC bei Fahrzeug A - Szenario 4

Anzahl der Kollisionen - Szenario 4 - Fahrzeug A			
	A:BL	A:AV	Reduktion
Gesamt []	127	50	61%
Vorderseite []	93	32	66%
Linke Seite []	18	12	33%
Rückseite []	1	1	0%
Rechte Seite []	15	5	67%

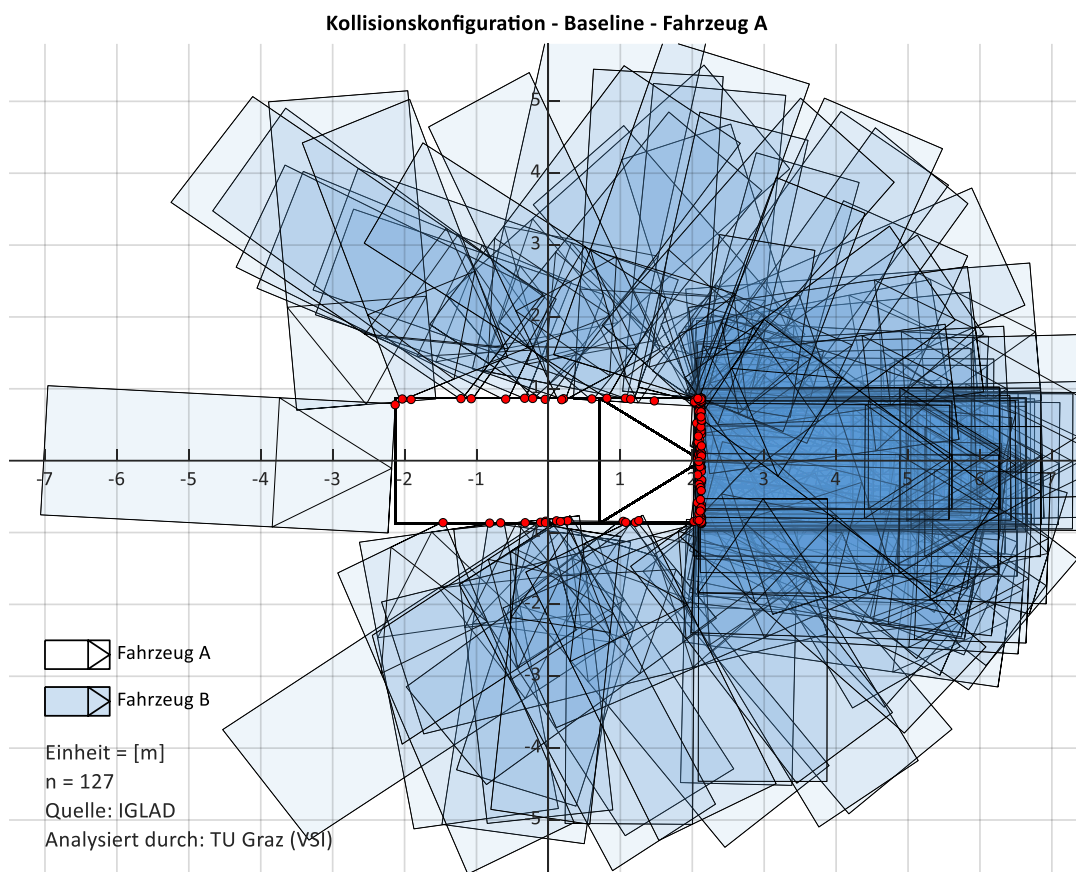


Abbildung 6-14: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Baseline)

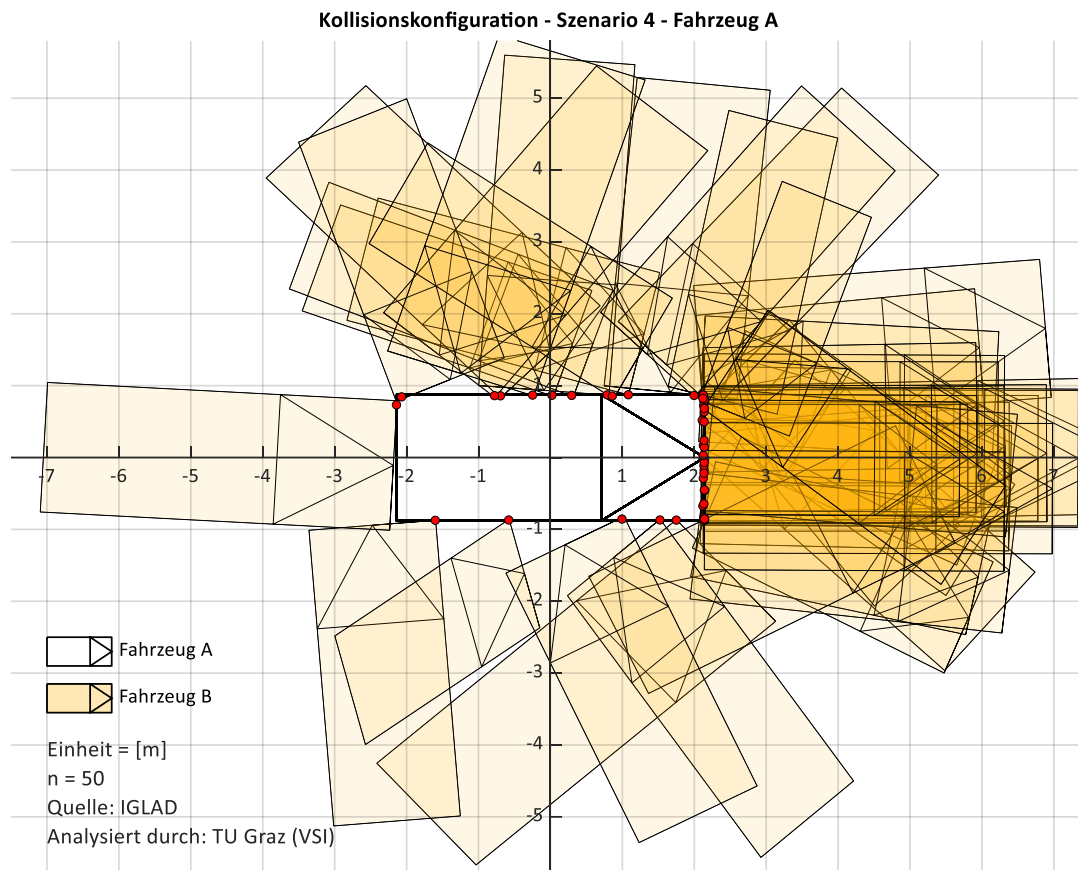


Abbildung 6-15: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Szenario 4)

Bei Fahrzeug B gibt es überwiegend Heck- und Frontkollisionen, siehe Abbildung 6-16. Diese treten bei der Baseline mit 120 aus 127 Unfällen auf, das entspricht 95% der gesamten Unfälle. Mit jeweils 60 Unfällen gibt es gleich viele Frontkollisionen wie Heckkollisionen. Die hohe Anzahl an Heckkollisionen begründet sich wiederum aus der großen Anzahl an Auffahrunfällen. Die Anzahl an Unfällen auf der linken beziehungsweise rechten Seite sind mit 3 beziehungsweise 4 Kollisionen zirka gleich häufig festzustellen, siehe Tabelle 6-9.

Die Kollisionskonfiguration in Abbildung 6-17 für das Szenario 4 zeigt für das Fahrzeug B eine Verringerung der Anzahl an Kollisionen über die gesamte Fahrzeugkontur gegenüber der Baseline. Mit der Ausnahme von einer Kollision, die auf der linken Seite verbleibt, befinden sich alle anderen Kollisionen im vorderen oder hinteren Bereich des Fahrzeugs.

Tabelle 6-9: Verteilung des FPOC bei Fahrzeug B - Szenario 4

Anzahl der Kollisionen - Szenario 4 - Fahrzeug B			
	B:BL	B:AV	Reduktion
Gesamt []	127	50	61%
Vorderseite []	60	25	58%
Linke Seite []	3	1	67%
Rückseite []	60	23	62%
Rechte Seite []	4	1	75%

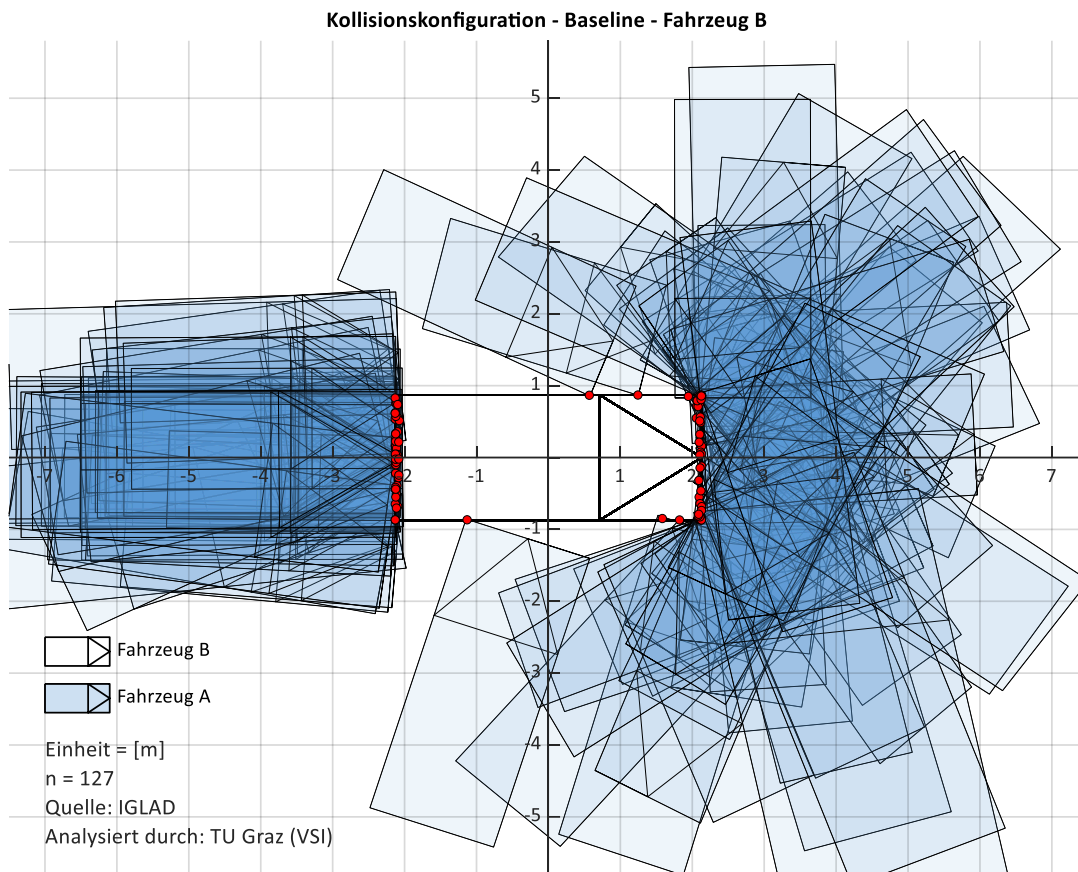


Abbildung 6-16: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Baseline)

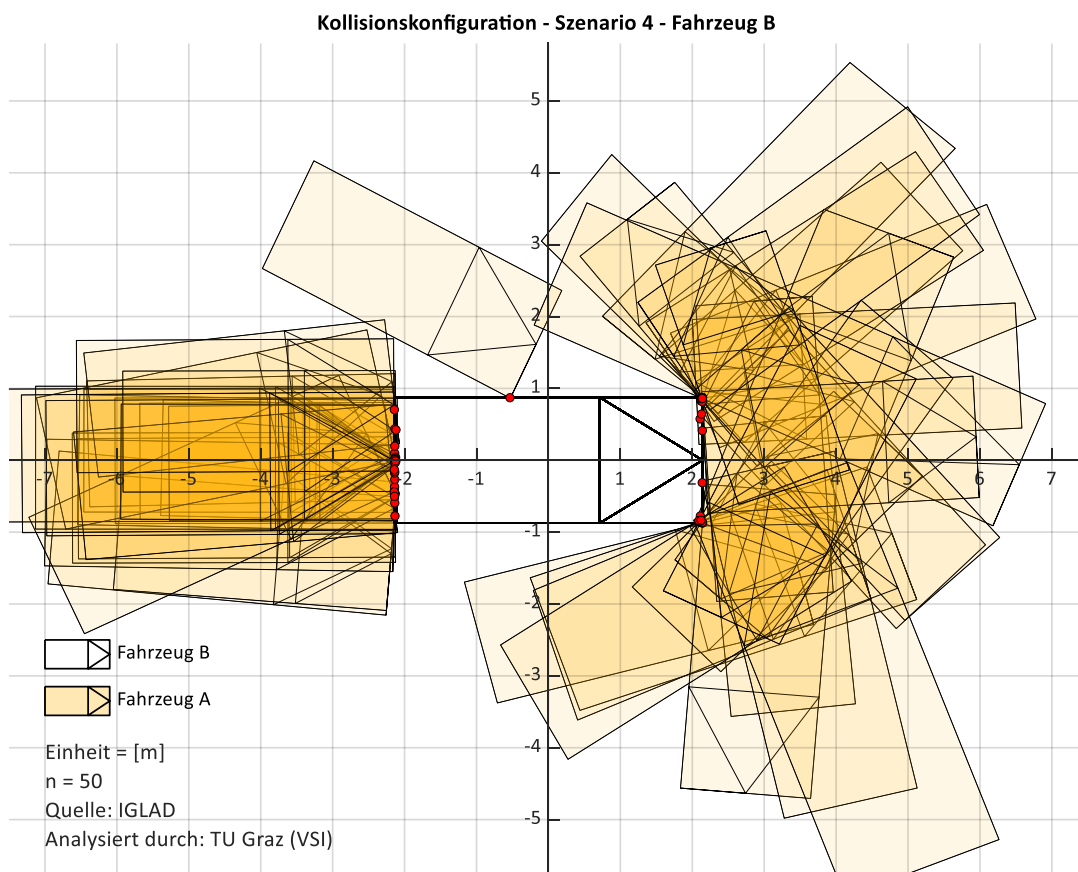


Abbildung 6-17: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Szenario 4)

Abbildung 6-18 und Abbildung 6-19 stellen die Änderung der Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur in Abhängigkeit des Winkels dar. In den Abbildungen werden die 50 verbleibenden Unfälle des Szenarios 4 mit den dazugehörigen Fällen der Baseline verglichen.

Bei Fahrzeug A sind die meisten Kollisionspunkte an den Eckpunkten der Vorderseite sowie in der Mitte der Vorderseite zu finden. Ansonsten verteilen sich die FPOC gleichmäßig über die beiden Seiten und die Vorderseite. In der Abbildung 6-18 ist ersichtlich, dass sich die Lage der FPOC durch das Treatment auf beiden Seiten verändert. Es ist eine Verlagerung der FPOC nach vorne feststellbar.

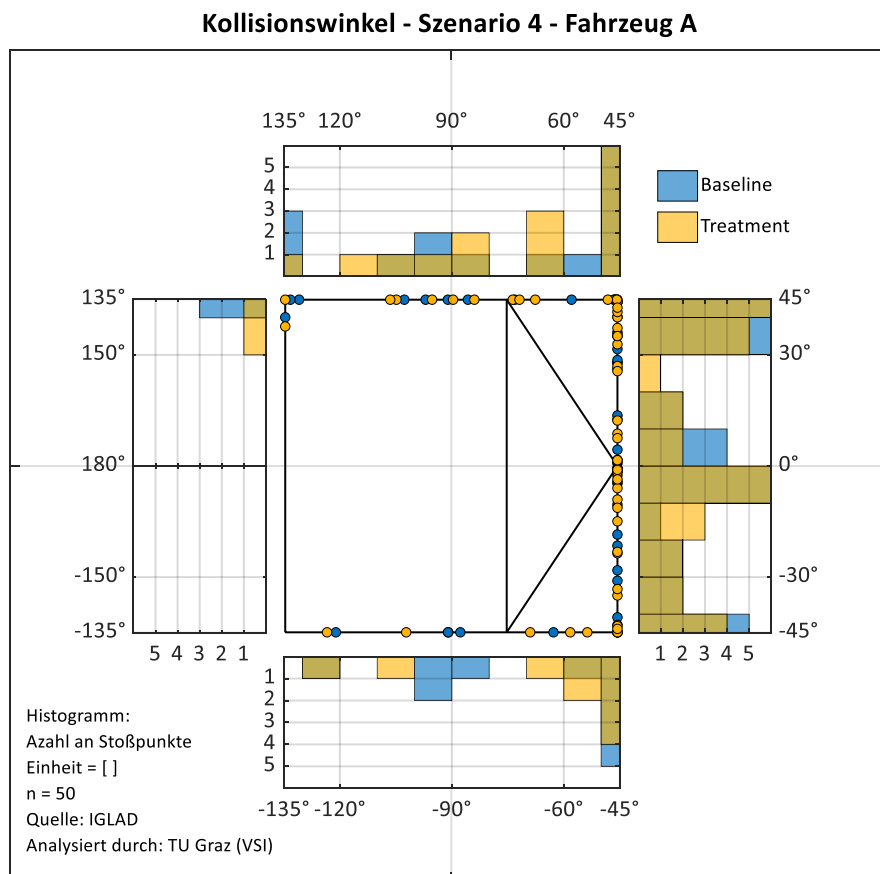


Abbildung 6-18: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur des Fahrzeugs B (Szenario 4)

Verglichen dazu ist bei Fahrzeug B im Bereich der Mitte der Rückseite des Fahrzeugs die Konzentration bei der Baseline am höchsten, siehe Abbildung 6-19. Durch das Treatment verlagern sich die FPOC etwas nach rechts. Im Bereich der Fahrzeugvorderseite befinden sich die meisten FPOC an den Eckpunkten. Durch das Treatment verlagern sich die FPOC von der Mitte der Vorderseite zu den Eckpunkten. Im Szenario 4 befindet sich bei Fahrzeug B der Großteil der FPOC entweder auf der Rückseite oder im Bereich der vorderen Eckpunkte.

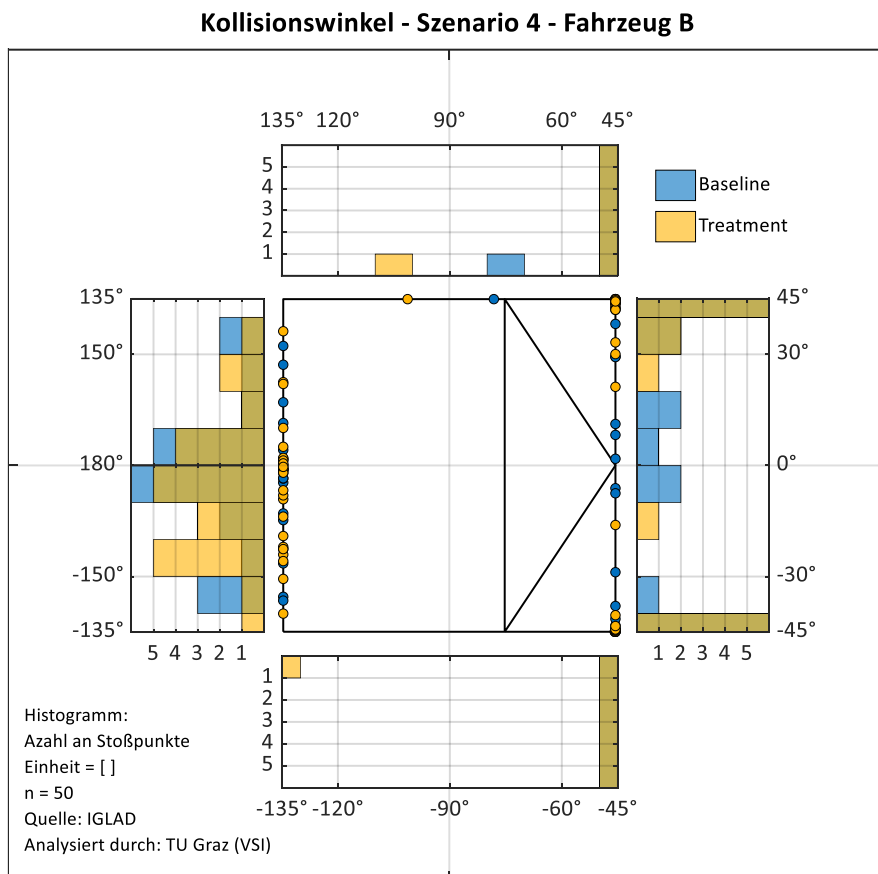


Abbildung 6-19: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur des Fahrzeugs B (Szenario 4)

6.2.6 Kollisionswinkel und Gierwinkel

Die Veränderung des Kollisionswinkels (CA) sowie des Gierwinkels (delta-OYA) sind in Abbildung 6-20 und Abbildung 6-21 dargestellt. In den Abbildungen wird jeweils der Winkel des Einheitsfahrzeugs dargestellt. Die Änderung des OYA ist eng mit der Änderung des CA verknüpft. Je geringer die Änderung des CA ist, desto geringer ist auch die Änderung des OYA. Wenn sich beide Größen nicht ändern, ist die Kollisionskonfiguration der Treatment-Simulation ident mit der Baseline.

Bei Fahrzeug A ändert sich der CA und der OYA hauptsächlich bei Kollisionen im Bereich der Fahrzeugseiten, siehe Abbildung 6-20. Die Verschiebung bei den seitlichen Kollisionen hat immer dann einen negativen Einfluss, wenn sich der FPOC in den Bereich der Fahrgastzelle verlagert. Der Grund liegt darin, dass auf Höhe der Fahrgastzelle kaum Deformationsweg vorhanden ist. Ein geringer Deformationsweg wirkt sich unvorteilhaft auf die Energieabsorption aus. Dieser Effekt ist beispielsweise bei Kollisionen, welche in der Baseline einen CA von zirka 45° besitzen, festzustellen. Umgekehrt wirkt sich eine Verlagerung weg von der Fahrgastzelle positiv aus. Diese Wirkung tritt zum Beispiel bei den Unfällen mit einem CA von zirka 90° in der Baseline auf. Im Bereich der Fahrzeugvorderseite gibt es nur bei 3 von 32 Unfällen eine signifikante Änderung des CA.

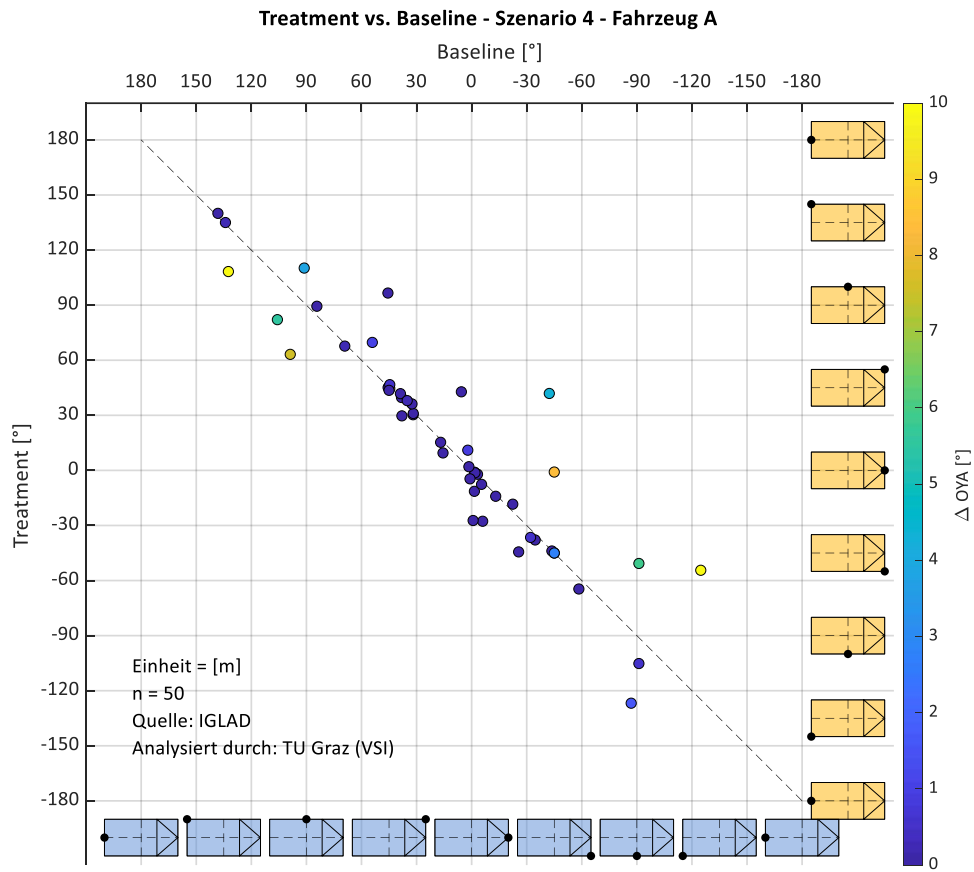


Abbildung 6-20: Änderung von CA und OYA des Fahrzeugs A (Szenario 4)

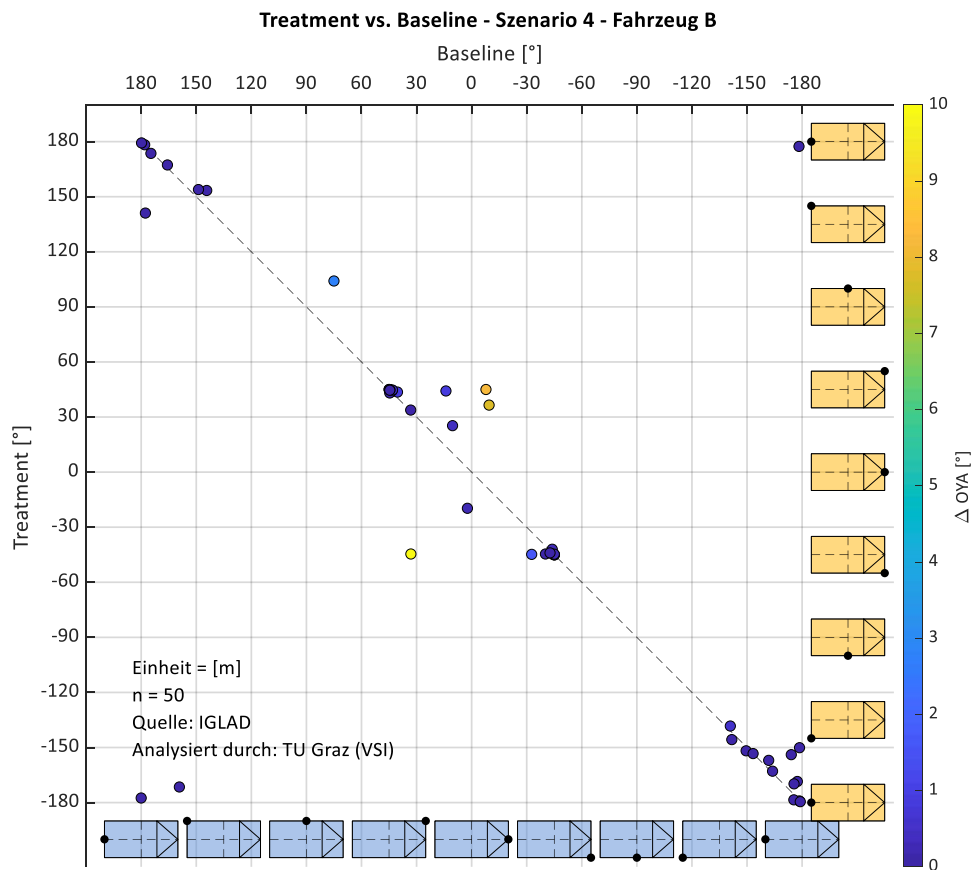


Abbildung 6-21: Änderung von CA und OYA des Fahrzeugs B (Szenario 4)

Bei Fahrzeug B ist deutlich zu erkennen, dass es nur wenige Seitenkollisionen gegeben hat und sich die Daten in der Mitte und am jeweiligen Ende der grau-unterbrochenen Linie ansammeln. Bei Fahrzeug B ändert sich der CA und OYA hauptsächlich bei Kollisionen an der Fahrzeugvorderseite.

6.3 Auswertung nach Unfalltypen

In diesem Kapitel wird als Beispiel für die Auswertung nach den Unfalltypen das Szenario 2 des Unfalltyps 3 herangezogen. In Abbildung 6-4 wurde bereits die Verteilung der Vermeidbarkeit und Minderung der Unfälle für den Unfalltyp 3 gezeigt. Die Anzahl der Unfälle ohne Eingriff beträgt 36% und ist ident mit der Anzahl der vermiedenen Unfälle, bei 28% gab es eine Minderung.

Abbildung 6-22 stellt die einzelnen Unfalltypen gegenüber. Bei den Unfällen des Typs 30 und 31 kommt das Fahrzeug B aus Sicht des Unfallverursachers von der linken Seite. Von den 20 Unfällen, bei denen das Fahrzeug B von links kommt, sind 6 vermeidbar, 5 werden gemindert und bei 9 findet kein Eingriff statt. Im Vergleich dazu sind bei den 8 Unfällen des Typs 32, also bei denen das Fahrzeug B von der rechten Seite kommt, 4 vermeidbar, 3 werden gemindert und nur bei einem findet kein Eingriff statt.

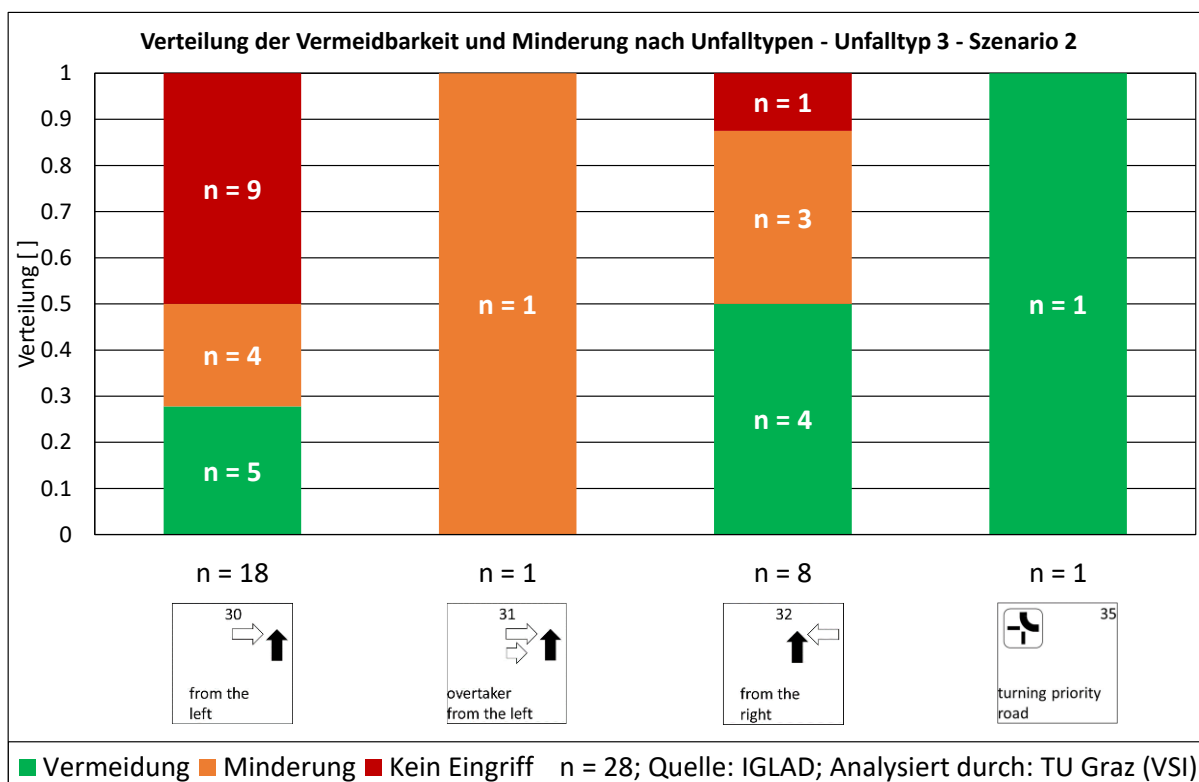


Abbildung 6-22: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 3 - Szenario 2

6.3.1 Kollisionskonfiguration

Bei der Kollisionskonfiguration ist auffallend, dass sich sowohl bei Fahrzeug A als auch bei Fahrzeug B der FPOC am häufigsten an der Fahrzeugvorderseite befindet, siehe Tabelle 6-10 und Tabelle 6-11. Bei Fahrzeug B sind bei der Baseline sogar 89% der FPOC an der Fahrzeugvorderseite. Bei Fahrzeug A sind bei der Baseline 43% der Fälle auf der Vorderseite, 25% der Fälle auf der rechten und 32% auf der linken Seite. Bei beiden Fahrzeugen gibt es keine Heckkollision im Stichprobenumfang.

Tabelle 6-10: Verteilung des FPOC bei Fahrzeug A – Unfalltyp 3 - Szenario 2

Anzahl der Kollisionen - Unfalltyp 3 - Szenario 2 - Fahrzeug A			
	A:BL	A:AV	Reduktion
Gesamt []	28	18	36%
Vorderseite []	12	5	58%
Linke Seite []	9	8	11%
Rückseite []	0	0	-
Rechte Seite []	7	5	29%

Tabelle 6-11: Verteilung des FPOC bei Fahrzeug B – Unfalltyp 3 - Szenario 2

Anzahl der Kollisionen - Unfalltyp 3 - Szenario 2 - Fahrzeug B			
	B:BL	B:CV	Reduktion
Gesamt []	28	18	36%
Vorderseite []	25	16	36%
Linke Seite []	1	0	100%
Rückseite []	0	0	-
Rechte Seite []	2	2	0%

In den Tabellen ist ersichtlich, dass durch das Treatment eine Reduktion von 28 auf 18 Unfälle stattfindet. Aufgrund der geringen Anzahl an Kollisionen an den Fahrzeugseiten ist bei Fahrzeug B vor allem die Reduktion der Kollisionen an der Fahrzeugvorderseite von Relevanz. Diese beträgt 36% gegenüber der Baseline. Bei Fahrzeug A wird die Anzahl an Frontalkollisionen um 58% verringert und stellt somit die stärkste Reduktion dar. Der Rückgang an der linken Seite ist mit 11% am geringsten.

Bei Fahrzeug A werden gegenüber der Baseline vor allem die Unfälle auf der rechten Vorderseite vermieden, siehe Abbildung 6-23 und Abbildung 6-24. Durch das Treatment konzentrieren sich die Kollisionen auf den Bereich des linken vorderen Eckpunkts in Richtung der linken Fahrzeugseite sowie über die gesamte rechte Fahrzeugseite. Bei Fahrzeug B findet eine gleichmäßige Minderung der Kollisionen über die gesamte Fahrzeugvorderseite statt, siehe Abbildung 6-25 und Abbildung 6-26.

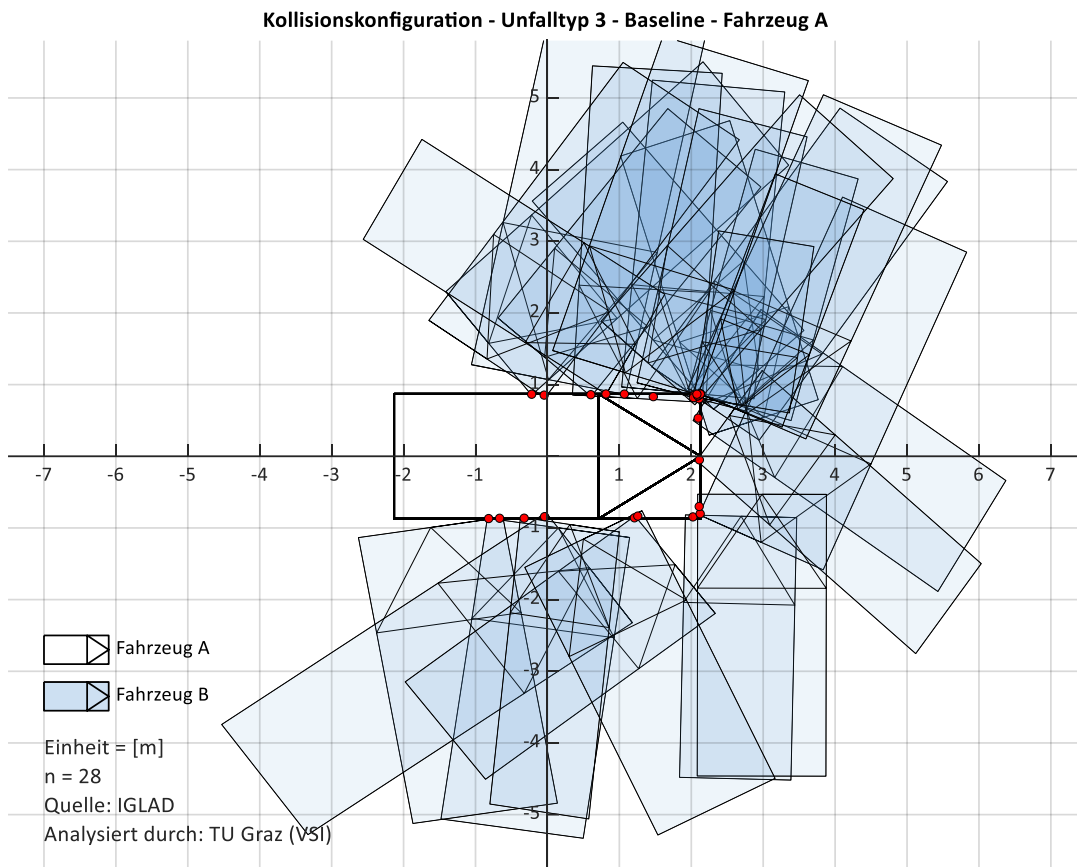


Abbildung 6-23: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 3 - Baseline)

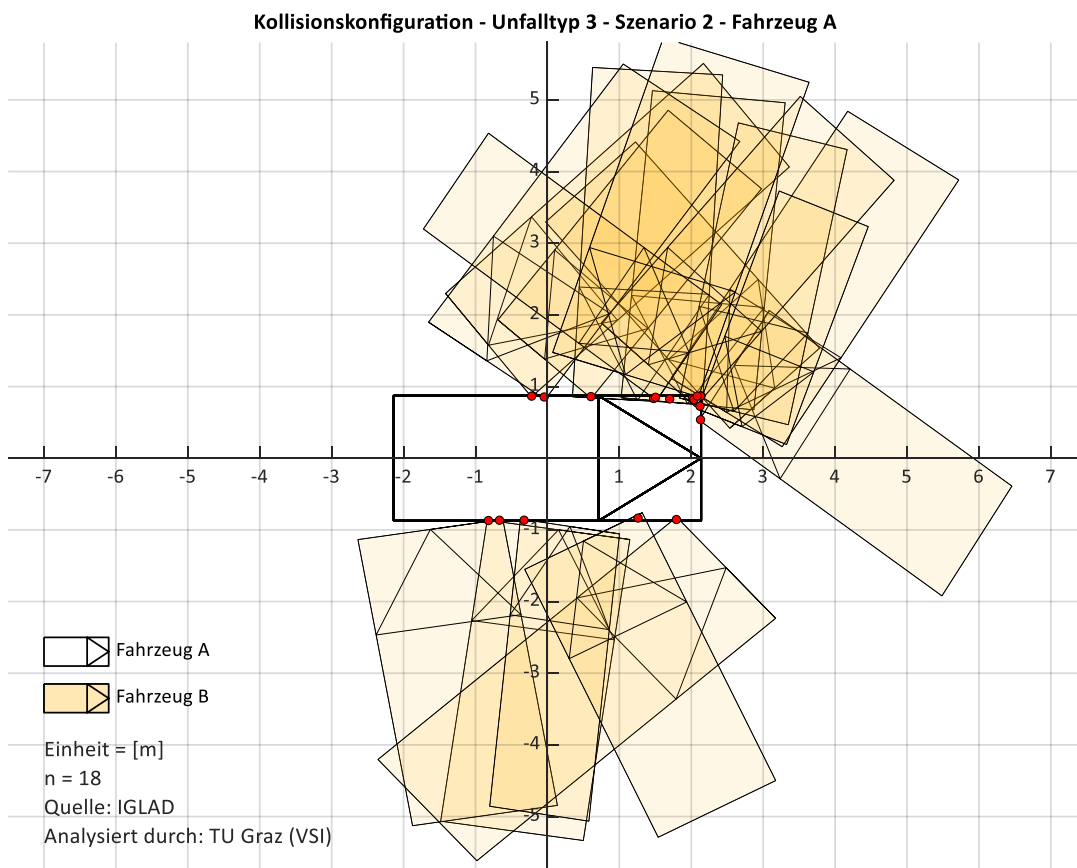


Abbildung 6-24: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 3 - Szenario 2)

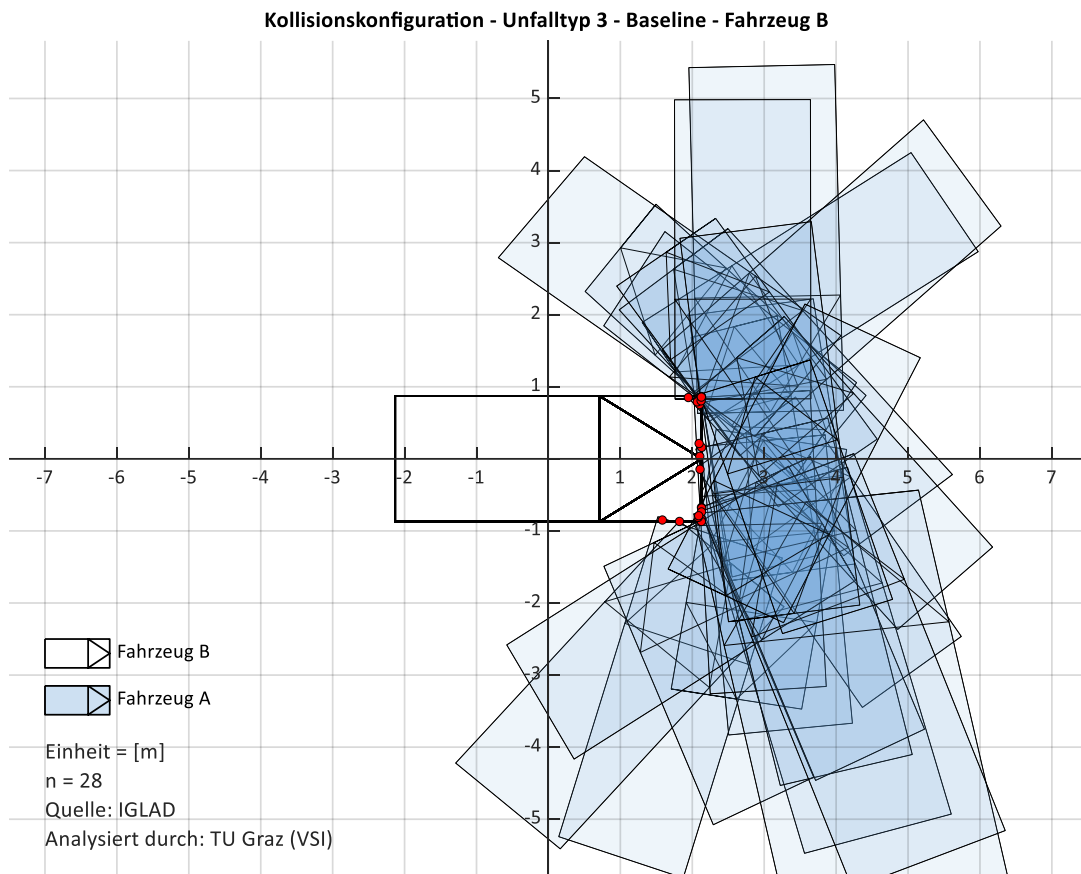


Abbildung 6-25: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 3 - Baseline)

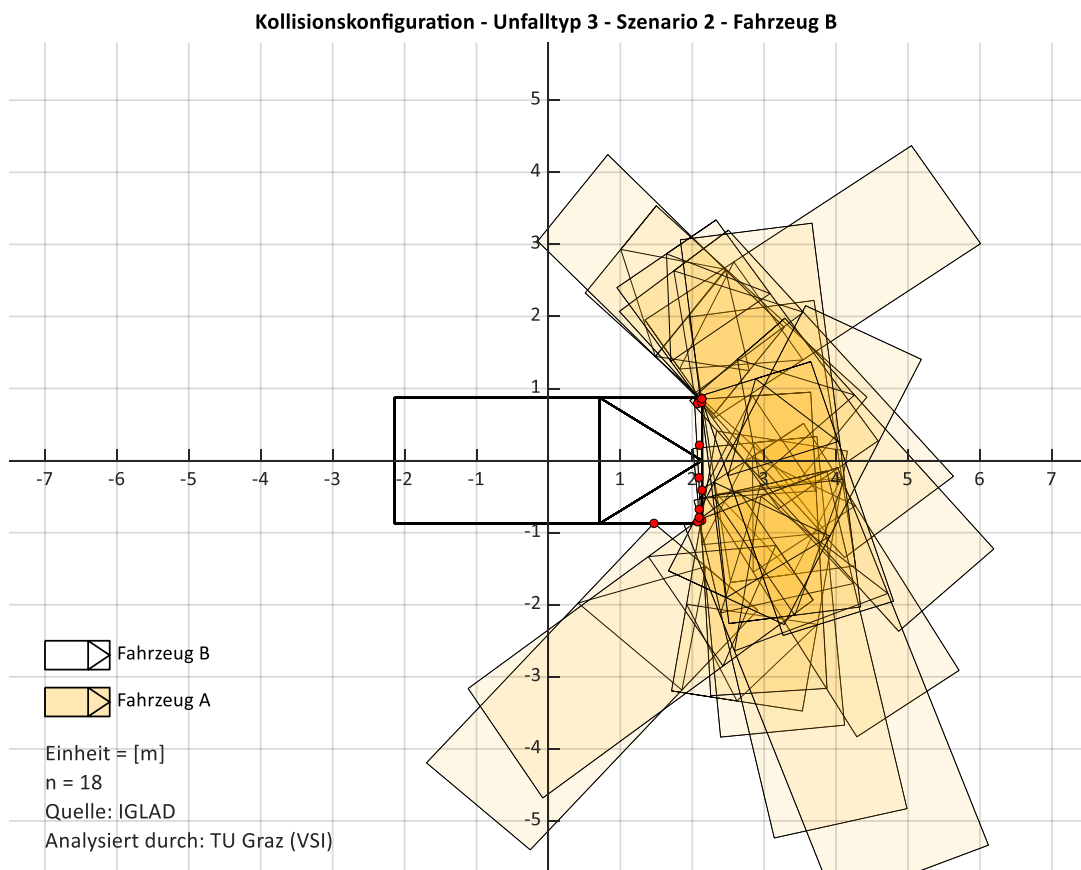


Abbildung 6-26: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 3 - Szenario 4)

Abbildung 6-27 und Abbildung 6-28 stellen die Änderungen der FPOC durch das Treatment dar. Bei Fahrzeug A ist keine deutliche Tendenz bezüglich einer Verlagerung der Kollisionspunkte ersichtlich. Auffällig ist die Verschiebung eines einzelnen Kollisionspunkts von der Mitte der rechten Fahrzeugseite in Richtung des vorderen rechten Eckpunkts. An der linken vorderen Seite findet eine kleine Verschiebung zweier Kollisionspunkte statt.

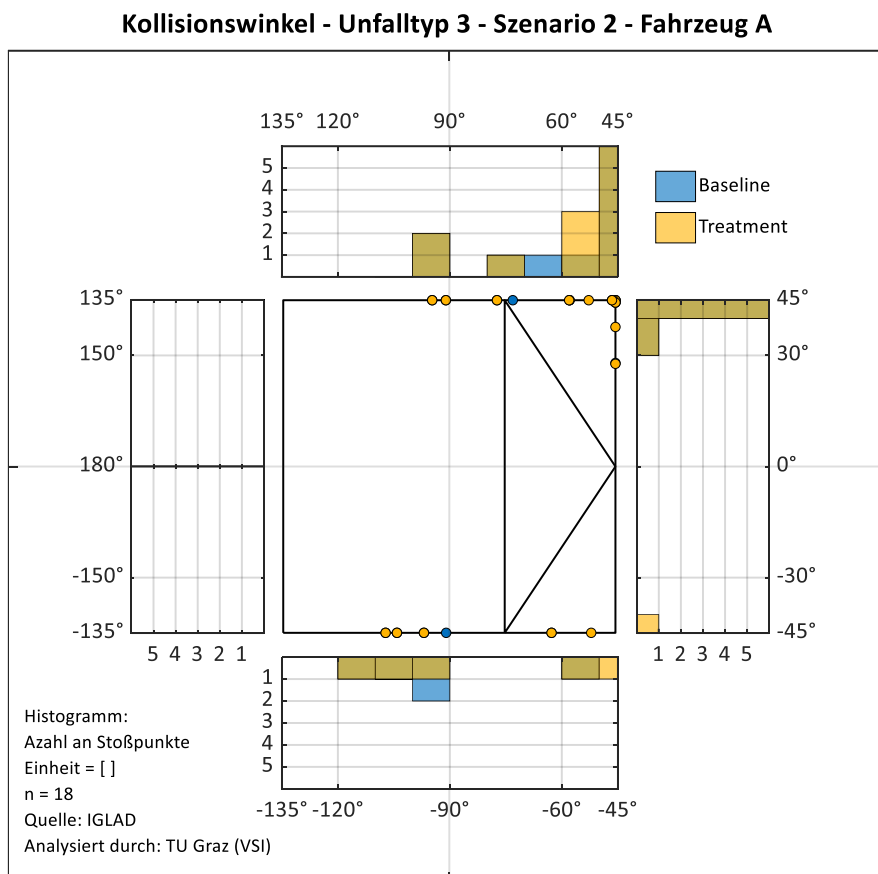


Abbildung 6-27: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur des Fahrzeugs A (Unfalltyp 3 - Szenario 2)

Bei Fahrzeug B gibt es eine Verlagerung der FPOC von der Fahrzeugmitte zur rechten Vorderseite. Dieser Effekt tritt bei Unfalltyp 30, das sind Einbiegen/Kreuzen-Unfälle bei dem das Fahrzeug B von links kommt, auf. Aufgrund des Bremsengriffs fährt das Fahrzeug A nicht so weit in die Kreuzung ein, als in der Baseline. Der Bremsengriff bewirkt damit eine Verschiebung des FPOC nach rechts. An der linken Vorderseite gibt es keine Veränderung des FPOC.

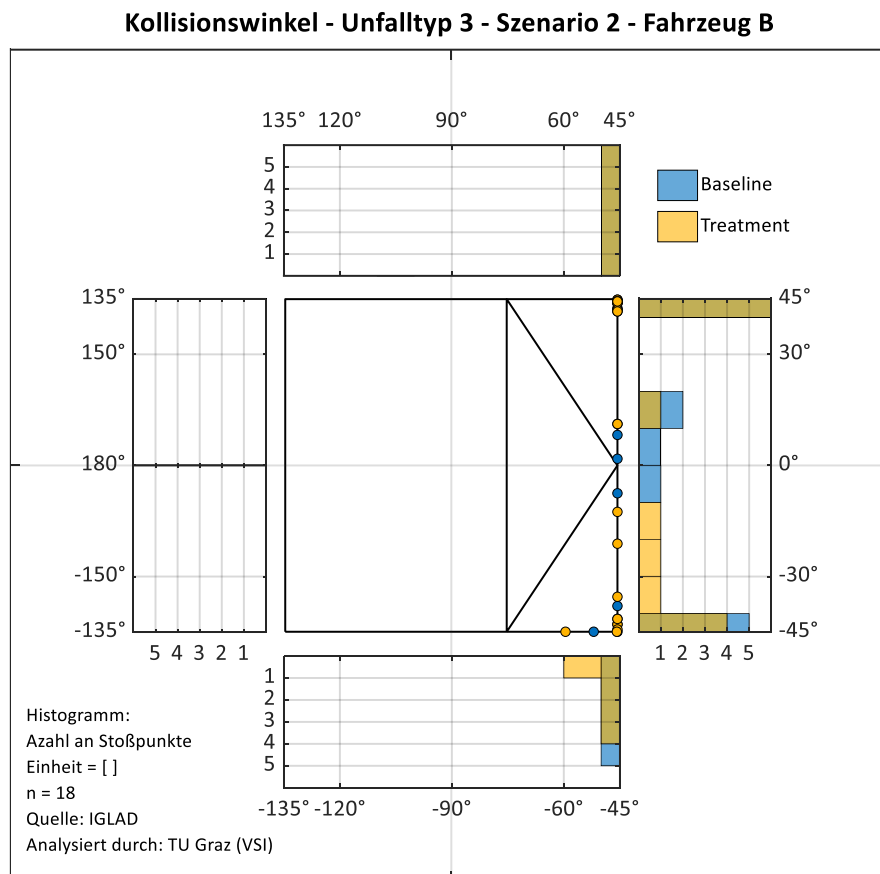


Abbildung 6-28: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur des Fahrzeugs B (Unfalltyp 3 - Szenario 2)

6.3.2 Kollisionswinkel und Gierwinkel

Abbildung 6-29 und Abbildung 6-30 stellen die Änderung des CA sowie des OYA durch das Treatment dar. Bei Fahrzeug A ergeben sich durch die große Anzahl an seitlichen Kollisionen zwei Datenhäufungspunkte für die rechte und linke Fahrzeugseite. Bis auf einen Ausreißer auf der rechten Seite ist keine große Änderung des CA feststellbar. Dieser Ausreißer wurde zuvor bei Abbildung 6-27 angesprochen. Das gleiche gilt für die Änderung des OYA, welcher sich nur in zwei Fällen signifikant ändert.

Bei Fahrzeug B sind zwei Datenhäufungspunkte beim linken und rechten vorderen Eckpunkt ersichtlich. Beim linken Eckpunkt ändert sich weder der CA noch der OYA. Beim rechten Eckpunkt ist eine minimale Verschiebung des CA sowie des OYA feststellbar. Eine signifikante Änderung des CA findet im Bereich der Fahrzeugvorderseite statt. Diese Abweichung ist auch in Abbildung 6-28 ersichtlich und ist wie bereits erwähnt durch die Verlagerung des FPOC durch den Bremsingriff des Fahrzeugs A nach rechts zu begründen.

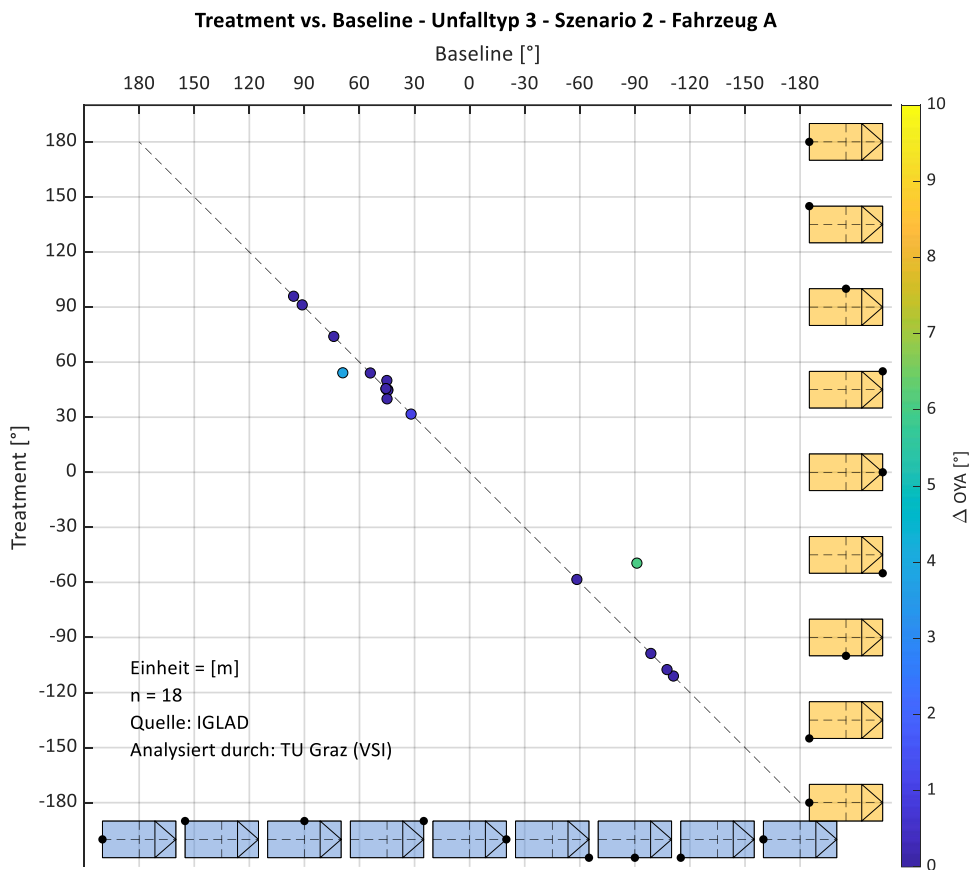


Abbildung 6-29: Änderung von CA und OYA des Fahrzeugs A (Unfalltyp 3 - Szenario 2)

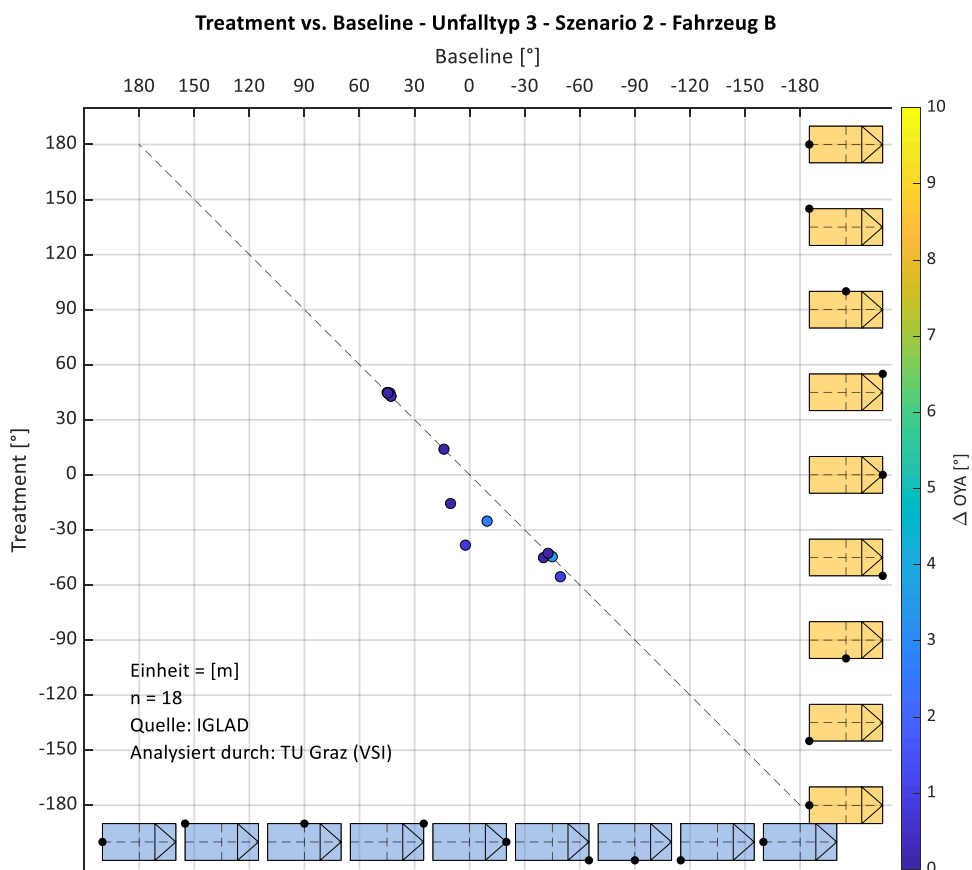


Abbildung 6-30: Änderung von CA und OYA des Fahrzeugs B (Unfalltyp 3 - Szenario 2)

6.3.3 Kollisionsgeschwindigkeit

Wird die Kollisionsgeschwindigkeit der nicht vermiedenen Unfälle mit der Baseline verglichen, ist auffällig, dass das Fahrzeug B im Mittel eine deutlich höhere Kollisionsgeschwindigkeit, als das Fahrzeug A aufweist, siehe Abbildung 6-31 und Tabelle 6-12. Das wird dadurch begründet, dass das Fahrzeug A bei 78% der Unfälle in die Kreuzung einbiegt und in 12% der Unfälle die Kreuzung geradeaus durchfährt. Fahrzeug B hingegen durchfährt die Kreuzung in allen Fällen geradeaus. Für Fahrzeug B ist keine signifikante Änderung der Kollisionsgeschwindigkeit feststellbar. Bei Fahrzeug A ist eine Änderung beim Median und beim Mittelwert feststellbar. Der Mittelwert ändert sich von 19,3 km/h (SD = 9,9) auf 15,5 km/h (SD = 12,4), der Median von 16 km/h auf 12,4 km/h.

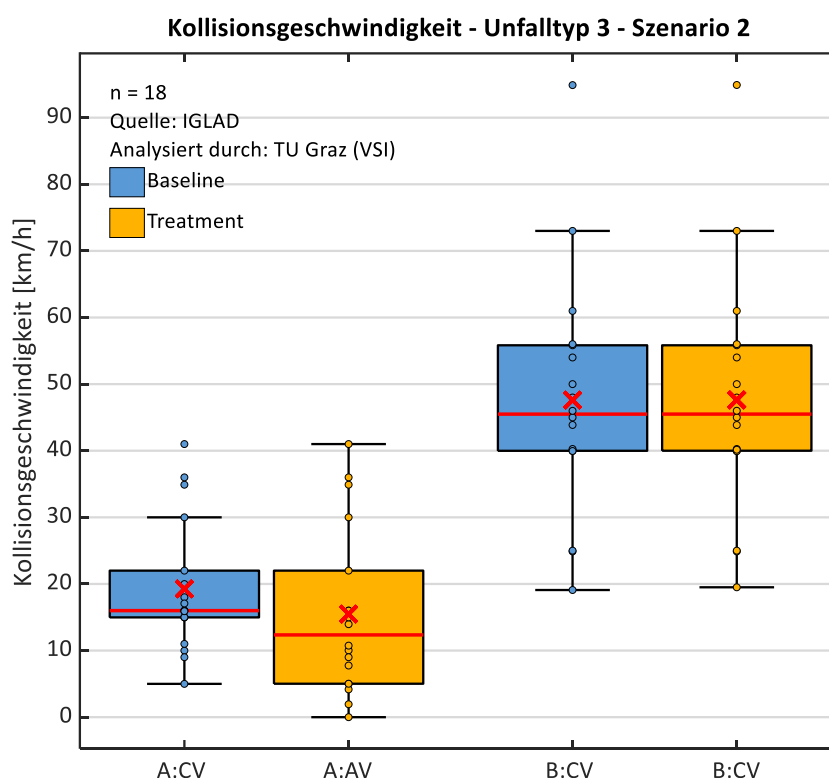


Abbildung 6-31: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 2

Tabelle 6-12: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 2

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 3 - Szenario 2				
	A:BL	A:AV	B:BL	B:CV
Number n []	18	18	18	18
Median [km/h]	16,0	12,4	45,5	45,5
Mean Value [km/h]	19,3	15,5	47,6	47,6
Standard deviation [km/h]	9,9	12,4	17,7	17,7
Variance [(km/h) ²]	98,7	154,7	313,9	312,6
Minimum [km/h]	5,0	0,0	19,1	19,5
Maximum [km/h]	41,0	41,0	94,9	94,9

Wird die Kollisionsgeschwindigkeit in Abhängigkeit des CA betrachtet ist bei Fahrzeug A erkennbar, dass die höchsten Kollisionsgeschwindigkeiten am linken vorderen Eckpunkt sowie im hinteren Bereich der rechten Seite des Fahrzeugs anzutreffen sind, siehe Abbildung 6-32.

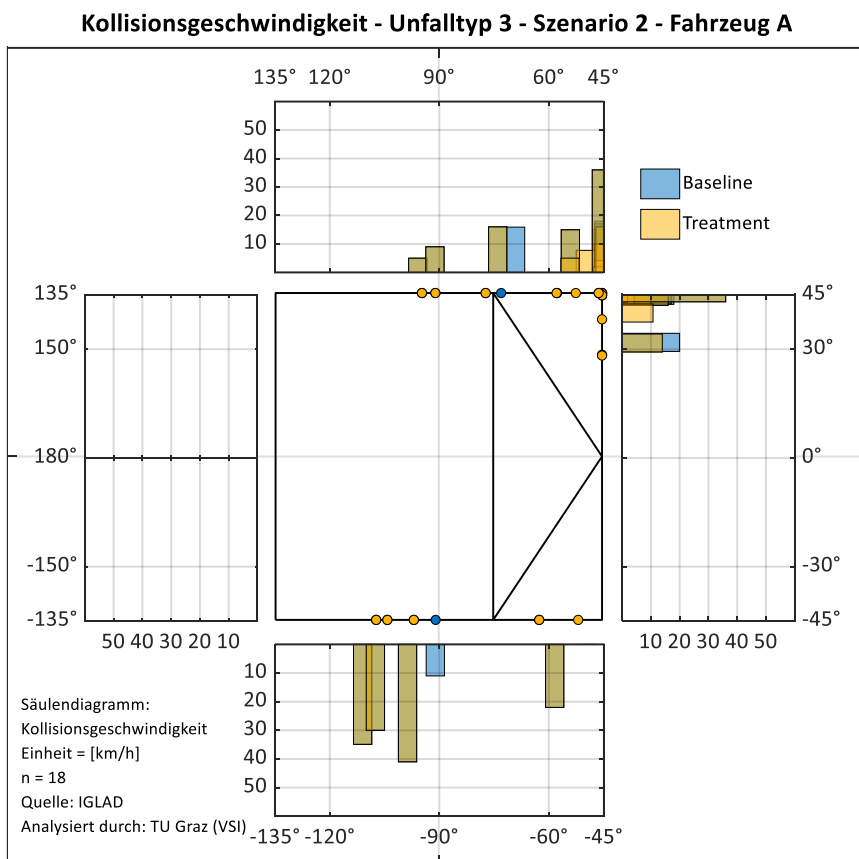


Abbildung 6-32: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit des Fahrzeugs A (Unfalltyp 3 - Szenario 2)

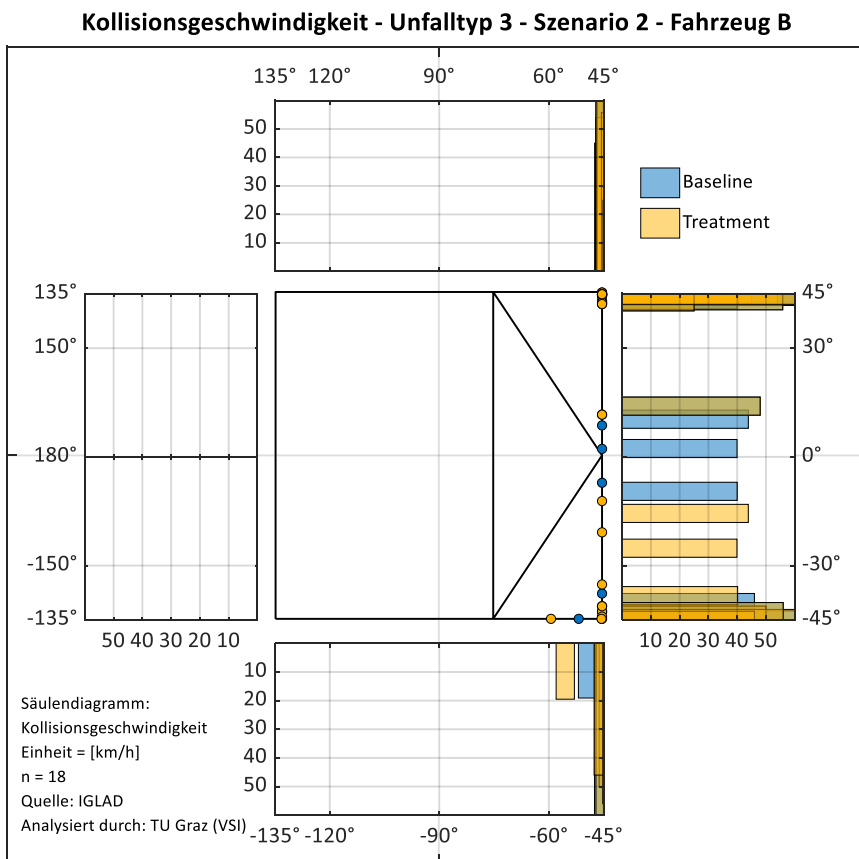


Abbildung 6-33: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit des Fahrzeugs B (Unfalltyp 3 - Szenario 2)

Bei Fahrzeug B ist eine ähnliche Tendenz feststellbar. Die höchsten Kollisionsgeschwindigkeiten treten hier an den beiden vorderen Eckpunkten auf, siehe Abbildung 6-33. Außerdem ist in dieser Abbildung der in Kapitel 6.3.1 beschriebene Effekt bei Unfalltyp 30, dass sich der FPOC nach rechts verschiebt, ersichtlich.

6.3.4 Delta-v

Bei der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung ist keine signifikante Änderung bei beiden Fahrzeugen festzustellen. Es ist jedoch bei beiden Fahrzeugen eine Tendenz zur Verringerung des delta-v sichtbar, siehe Abbildung 6-34 und Tabelle 6-13. Bei Fahrzeug A ändert sich der Mittelwert von 20,5 km/h (SD = 11,2) auf 18,4 km/h (SD = 11,3) und bei Fahrzeug B von 20,8 km/h (SD = 8,1) auf 18,8 km/h (SD = 8).

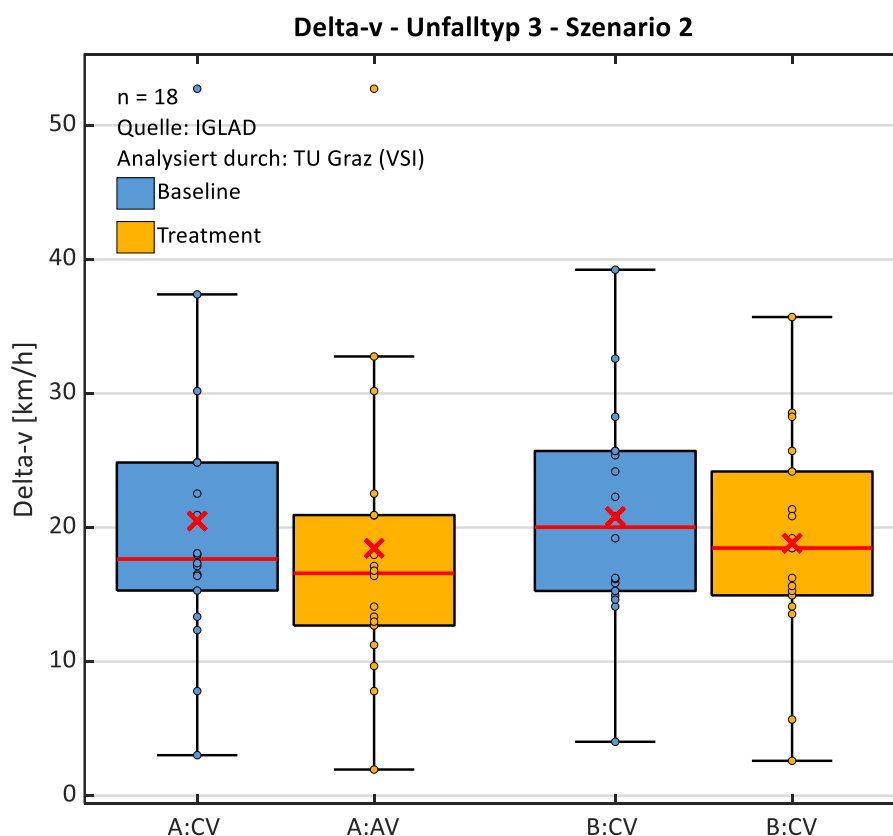


Abbildung 6-34: Box-Plot von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 2

Tabelle 6-13: Statistische Kennwerte von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 2

delta-v - Unfalltyp 3 - Szenario 2				
	A:BL	A:AV	B:BL	B:CV
Number n []	18	18	18	18
Median [km/h]	17,7	16,6	20,0	18,5
Mean Value [km/h]	20,5	18,4	20,8	18,8
Standard deviation [km/h]	11,2	11,3	8,1	8,0
Variance [(km/h)^2]	125,8	128,1	65,7	63,9
Minimum [km/h]	3,0	2,0	4,0	2,6
Maximum [km/h]	52,7	52,7	39,2	35,7

Abbildung 6-35 und Abbildung 6-36 stellen das delta-v in Abhängigkeit des CA bei Fahrzeug A und Fahrzeug B dar. Bei Fahrzeug A befindet sich der Unfall mit dem höchsten delta-v beim linken vorderen Eckpunkt. Bei Fahrzeug B befinden sich die höchsten Werte für das delta-v an den beiden vorderen Eckpunkten.

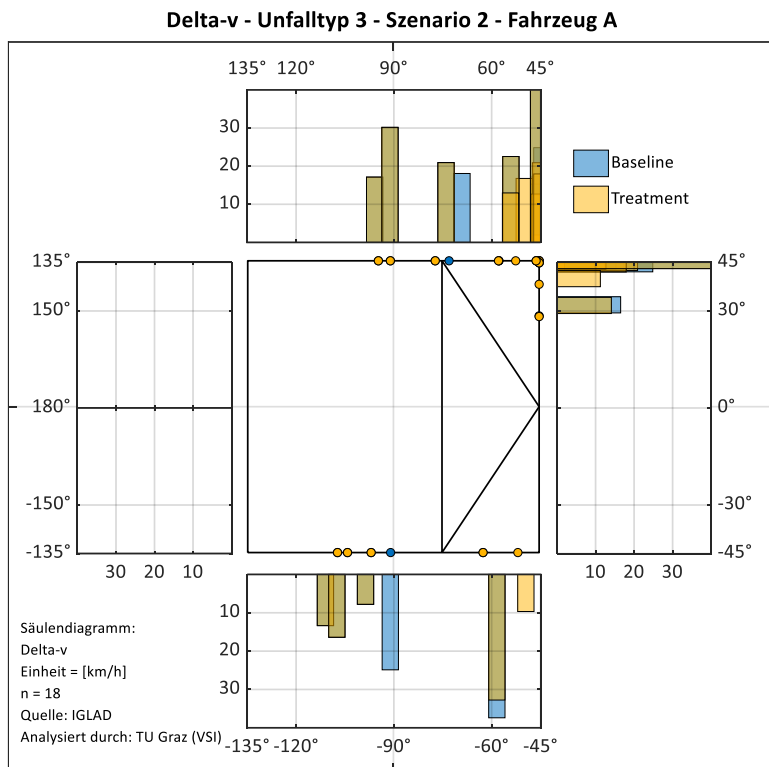


Abbildung 6-35: Verteilung von delta-v des Fahrzeugs A (Unfalltyp 3 - Szenario 2)

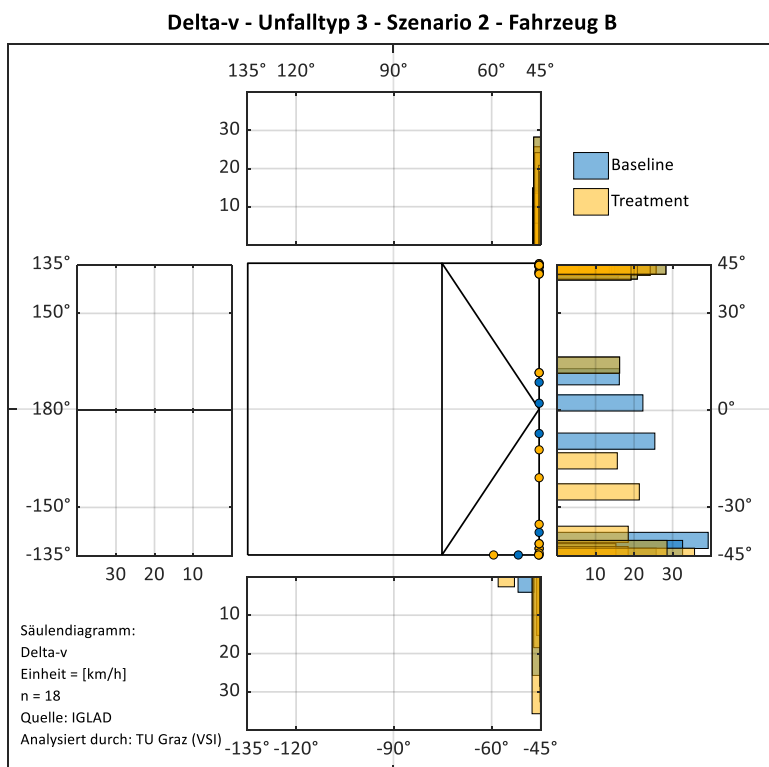


Abbildung 6-36: Verteilung von delta-v des Fahrzeugs B (Unfalltyp 3 - Szenario 2)

6.4 TTC-Variation

In diesem Kapitel wird der Einfluss des TTC auf die Unfallvermeidbarkeit und Minderung diskutiert. Der TTC stellt einen wichtigen Parameter des betrachteten Systems dar, da über diesen Wert festgelegt wird, ab welchem Zeitpunkt das System eingreift. Im Gegensatz zu den Reibwerten und der resultierenden Verzögerungsfähigkeit des Bremssystems ist dieser Wert nicht durch die vorhandenen physikalischen Grenzen definiert und begrenzt, sondern kann variiert werden.

In dieser Betrachtung soll die Vermeidbarkeit und Minderung bei einer TTC von 0,8 bis 1,6 s mit einer Schrittweite von 0,2 s betrachtet werden. Es ergeben sich dadurch fünf verschiedene Eingriffsstrategien. Abbildung 6-37 stellt diese in Abhängigkeit der vier Szenarien dar.

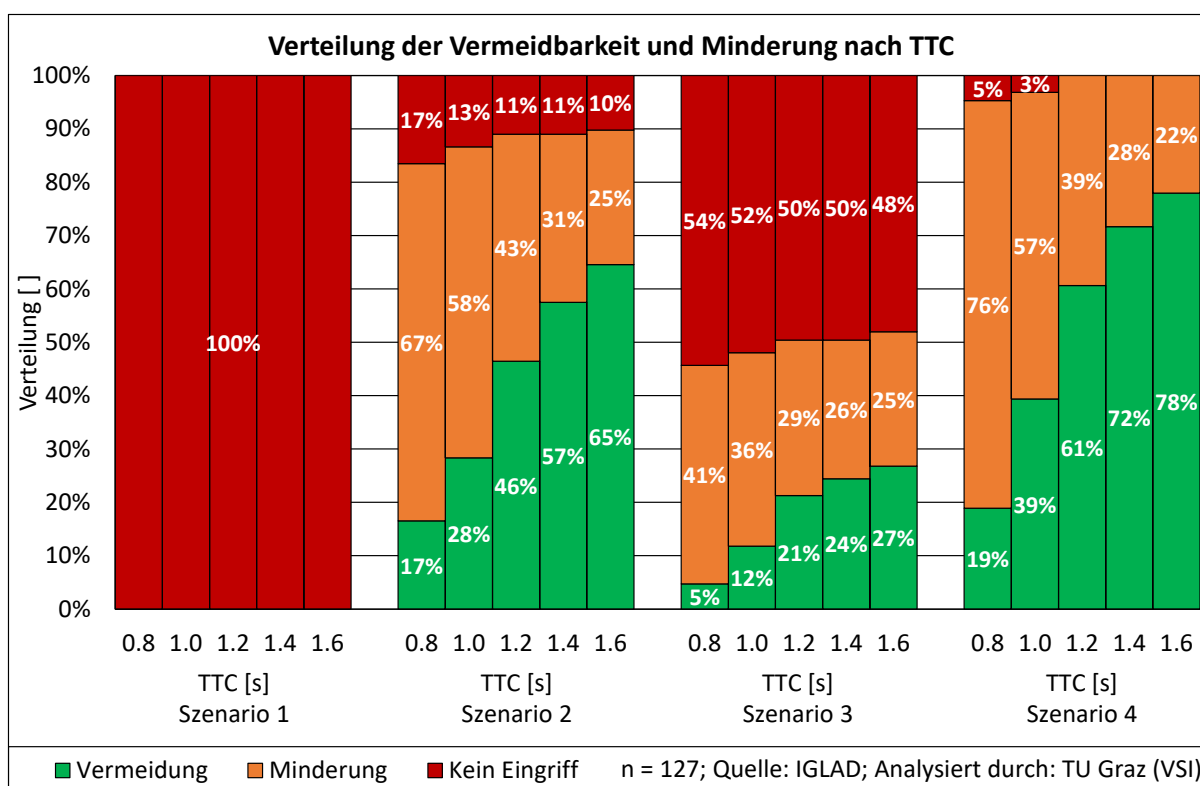


Abbildung 6-37: Vermeidbarkeit und Minderung nach TTC

Bei allen Treatment-Szenarien zeigt sich, dass der prozentuelle Anteil der Unfälle ohne Eingriff mit der Erhöhung des TTC von 0,8 bis 1,2 sinkt. Bei Szenario 2 und Szenario 3 besteht bei einer TTC von 1,2 s und 1,4 s kein Unterscheid, erst bei einer TTC von 1,6 s fällt die Anzahl weiter. Bei Szenario 4 gibt es ab einer TTC von 1,2 s keinen Unfall ohne Eingriff.

Die Vermeidbarkeit steigt mit der Erhöhung der TTC an und ändert sich bei allen Treatment-Szenarien nicht linear zur TTC. Vergleicht man die Werte bei einem TTC von 0,8 s mit den Werten bei einer TTC von 1,6 s, ist eine Vergrößerung der Vermeidbarkeit um den Faktor 3,8 bei Szenario 2, 5,4 bei Szenario 3 und 4,1 bei Szenario 4 gegeben.

7 ZUSAMMENFASSUNG

Die Arbeit zeigt, dass der Einsatz einer Notbremsfunktion ein sehr großes Potenzial zur Unfallvermeidung bei europäischen urbanen Unfallszenarien besitzt. Sofern beide Personenkraftwagen mit einer Notbremsfunktion ausgestattet sind, könnten 61% der Unfälle der verwendeten Stichprobe vermieden. Besitzt nur einer der beiden Unfallbeteiligten eine Notbremsfunktion, ist die Vermeidbarkeit der Unfälle mehr als doppelt so groß als ohne, sofern der Unfallverursacher damit ausgestattet ist. Die Vermeidbarkeit eines Unfalls kann durch die Variation der TTC bedeutend beeinflusst werden.

Bezüglich der Vermeidbarkeit nach Unfalltypen ist die Vermeidbarkeit von Auffahrunfällen bei Szenario 2 am höchsten. Die Minderung oder Vermeidbarkeit bei Kreuzungsunfällen, in welchen der Unfallgegner von links kommt, ist im Vergleich zu allen anderen Unfalltypen am geringsten. Bei Szenario 3 kann das Notbremssystem situationsbedingt bei Auffahrkollisionen nicht eingreifen. Bei Unfalltyp 3 (Einbiegen/Kreuzen-Unfälle) hat das System die höchste Vermeidbarkeit. Bei Szenario 4 können die Nachteile der Szenarien 2 und 3 ausgeglichen werden und es gibt außer bei Unfalltyp 20 eine Vermeidbarkeit von mindestens der Hälfte der Fälle.

Die Analyse der Kollisionsgeschwindigkeit führt zum Ergebnis, dass bei Szenario 2 und Szenario 3 nur bei den mit einer Notbremsfunktion ausgestatteten Fahrzeugen eine signifikante Änderung der Kollisionsgeschwindigkeit nachgewiesen werden kann. Bei Szenario 4 hat sich die Kollisionsgeschwindigkeit nur beim Unfallverursacher signifikant reduziert. Die Verringerung des Δv ist bei den Szenarien 2 und 4 signifikant und bei Szenario 3 nur als Tendenz erkennbar.

Bei der Kollisionskonfiguration der verbleibenden Unfälle konnte je nach Szenario eine Änderung des Kollisionswinkels, des Gierwinkels sowie des Erstkontaktpunktes festgestellt werden. Es ist daher keine allgemeine Aussage möglich, ob sich bei den verbleibenden Kollisionen neben der Kollisionsgeschwindigkeit auch die Unfallschwere minimiert oder ob diese in Einzelfällen sogar vergrößert wird.

Abschließend kann bezüglich der Prognose zukünftiger Pkw-Unfallszenarien gesagt werden, dass ein entscheidender Faktor darin bestehen wird, ob in Zukunft eine flächendeckende Ausstattung der Fahrzeuge mit einem AEB-System gegeben sein wird. Sofern alle Personenkraftwagen im Straßenverkehr mit einem AEB-System ausgestattet sind, ist für die zukünftigen Unfälle das Szenario 4 zu erwarten. Ist die Abdeckung geringer, wird sich ein Mix aus allen Szenarien einstellen. Außerdem wird die gewählte Eingriffsstrategie in den jeweiligen Fahrerassistenzsystemen einen großen Einfluss haben.

8 AUSBLICK

Im Zuge dieser Arbeit werden die Unfälle anhand einer großen Anzahl an Parametern untersucht. Es gibt jedoch noch viele weitere Möglichkeiten auf Basis dieser Arbeit weitere Untersuchungen durchzuführen. Es werden zum Beispiel die Unfälle nur für eine mögliche Eingriffsstrategie in der Tiefe analysiert und bei der Variation des TTC wird nur die gesamte Minderung und Vermeidbarkeit der Unfälle betrachtet. Außerdem werden nicht alle Zusammenhänge näher betrachtet, beispielsweise könnte der Zusammenhang zwischen der Vermeidbarkeit eines Unfalls und den Ausgangsgeschwindigkeiten beider Unfallbeteiligten untersucht werden. Zusätzlich zur Unterteilung nach Unfalltypen wäre auch eine Aufspaltung nach anderen Faktoren denkbar. Man könnte zum Beispiel unterscheiden, ob das Fahrzeug in der Vorkollisionsphase der Baseline bereits verzögert hat. Auch eine Untersuchung bezüglich der Parameter des Fahrzeuglenkers wären möglich, beispielsweise ob sich die Vermeidbarkeit bei unerfahrenen Autofahrern gegenüber einer Vergleichsgruppe unterscheidet. Diese Informationen können genutzt werden um die Effektivität einer Notbremsfunktion besser zu prognostizieren.

Um die Vielzahl an Einflussfaktoren, welche auf das Unfallgeschehen einwirken, genauer interpretieren zu können, besteht eine weitere Möglichkeit darin, die Unfalltypen nach dem dreistelligen Code der Unfalltypen auszuwerten um die Ursachen für verschiedene Einflüsse noch näher eingrenzen zu können. Da sich die Unterkategorie der Unfalltypen meist auf mehrere detaillierte Unfalltypen unterteilen, wird das jedoch erst aufgrund der Stichprobengröße mit einer steigenden Anzahl an Unfällen sinnvoll sein. Da sich die Anzahl an erfassten Unfällen in der IGLAD-Datenbank ständig erhöht, wird in Zukunft die Möglichkeit bestehen die Stichprobengröße zu erhöhen.

Im Zuge dieser Arbeit wird ein Überprüfungstool eingeführt, welches die Beschleunigungswerte der Fahrzeuge nach der Simulation analysiert und visualisiert. Als Prüfkriterium gibt das Tool derzeit aus ob im Zuge der Vorwärtssimulation ein Grenzwert überschritten wird oder nicht. Derzeit werden Beschleunigungsspitzen, welche durch die kinematische Simulation entstehen, manuell herausgelesen. Es besteht daher ein großes Potenzial in der Zeitersparnis durch eine Automatisierung des Tools.

9 LITERATURVERZEICHNIS

- [1] European Comission, *EU Road Safety Policy Framework 2021-2030 - Next steps towards "Vision Zero"*, SWD(2019) 283 final Hrsg., Brüssel: European Comission, 2019.
- [2] H. Burg und A. Moser, *Handbuch Verkehrsunfallrekonstruktion*, Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.
- [3] European Parliament, *Parliament approves EU rules requiring life-saving technologies in vehicles*, 20190410IPR37528 Hrsg., European Parliament, 2019.
- [4] H. Winner, S. Hakuli, F. Lotz und C. Singer, *Handbuch Fahrerassistenzsysteme*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015.
- [5] S. Pischinger und U. Seiffert, Hrsg., *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*, 8., aktualisierte und erweiterte Auflage Hrsg., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2016.
- [6] Society of Automotive Engineers (SAE), *J3016 - Taxonomy and Definitions for Terms Related to Driving Automation Systems for On-Road Motor Vehicles*, Society of Automotive Engineers (SAE), 2018.
- [7] T. Bertram, Hrsg., *Fahrerassistenzsysteme 2018*, Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2019, p. 248.
- [8] Robert Bosch GmbH, „Automatic emergency braking,“ [Online]. Available: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/en/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driver-assistance-systems/automatic-emergency-braking/>. [Zugriff am 11. 01. 2020].
- [9] K. Reif, *Fahrstabilisierungssysteme und Fahrerassistenzsysteme*, Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH Wiesbaden, 2010.
- [10] C. Schmidt, *Hardware-in-the-loop gestützte Entwicklungsplattform für Fahrerassistenzsysteme*, Kassel Germany: Kassel University Press, 2010, p. 135.
- [11] I. Isaksson-Hellman und M. Lindman, „The Effect of a Low-Speed Automatic Brake System Estimated From Real Life Data,“ *Annals of Advances in Automotive Medicine / Annual Scientific Conference*, Bd. 56, p. 231–240, 2012.
- [12] A. Tapani, *Traffic simulation modelling of rural roads and driver assistance systems*, Bd. 1211, Linköping: Linköping Univ, 2008, p. 199.
- [13] C. Zauner, E. Tomasch, W. Sinz, C. Ellersdorfer und H. Steffan, „Assessment of the effectiveness of Intersection Assistance Systems at urban and rural accident sites,“ Bremen, Fachverlag NW, März 2015.

- [14] K. Harald, K. Stefan, T. Ernst, H. Heinz, L. Peter und S. Wolfgang, „Prospective Evaluation of the Collision Severity L7e Vehicles Considering a Collision Mitigation System,“ *Transportation Research Procedia*, Bd. 14, p. 3877–3885, 2016.
- [15] F. Bella und R. Russo, „A Collision Warning System for rear-end collision: a driving simulator study,“ *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, Bd. 20, p. 676–686, 2011.
- [16] A. Piskun, Hrsg., *Karosseriebautage Hamburg 2017*, Wiesbaden: Springer Vieweg, 2017, p. 277.
- [17] European New Car Assessment Programme, *Test Protocol – AEB systems*, Version 2.0.1 Hrsg., European New Car Assessment Programme, 2017.
- [18] European New Car Assessment Programme, *Test Protocol – AEB VRU systems*, Version 2.0.2 Hrsg., European New Car Assessment Programme, 2017.
- [19] U. Sander, „Opportunities and limitations for intersection collision intervention-A study of real world 'left turn across path' accidents,“ *Accident; analysis and prevention*, Bd. 99, Nr. Pt A, p. 342–355, 2017.
- [20] T. Hummel, *Fahrerassistenzsysteme*, Bd. 03, Berlin: GDV, 2011, p. 62.
- [21] B. Fildes, M. Keall, N. Bos, A. Lie, Y. Page, C. Pastor, L. Pennisi, M. Rizzi, P. Thomas und C. Tingvall, „Effectiveness of low speed autonomous emergency braking in real-world rear-end crashes,“ *Accident; analysis and prevention*, Bd. 81, p. 24–29, 2015.
- [22] J. B. Cicchino, „Effectiveness of forward collision warning and autonomous emergency braking systems in reducing front-to-rear crash rates,“ *Accident; analysis and prevention*, Bd. 99, Nr. Pt A, p. 142–152, 2017.
- [23] B. Shahian Jahromi, T. Tulabandhula und S. Cetin, „Real-Time Hybrid Multi-Sensor Fusion Framework for Perception in Autonomous Vehicles,“ *Sensors (Basel, Switzerland)*, Bd. 19, Nr. 20, 2019.
- [24] E. Raphael, R. Kiefer, P. Reisman und G. Hayon, „Development of a Camera-Based Forward Collision Alert System,“ *SAE International Journal of Passenger Cars - Mechanical Systems*, Bd. 4, Nr. 1, p. 467–478, 2011.
- [25] J. G. S. F. H. Ines, *IGLAD-Codebook Phase 3*, Initiative for the global harmonisation of accident data (IGLAD), 2018.
- [26] E. Tomasch, *CEDATU-Codebook*, Graz: TU Graz, 2019.
- [27] Initiative for the global harmonisation of accident data (IGLAD), „Data Description - Available Data,“ [Online]. Available: <http://www.iglad.net/web/page.aspx?refid=2>. [Zugriff am 11. 01. 2020].
- [28] Dr. Steffan Datentechnik GmbH, *Handbuch PC-Crash*, Version 11.0 Hrsg., Linz: Dr. Steffan Datentechnik GmbH, 2016.

- [29] Google, „52°25'35.0"N 9°27'00.0"E - Google Maps,“ [Online]. Available: [https://www.google.at/maps/place/52°25'35.0"N+9°27'00.0"E/@52.425...](https://www.google.at/maps/place/52°25'35.0) [Zugriff am 27. 12. 2019].
- [30] Dresden University of Technology - Institute for Traffic Accident Research (VUFO), *Pre-Crash-Matrix (PCM) Format Specification v5.0*, Dresden: Dresden University of Technology - Institute for Traffic Accident Research (VUFO), 2019.
- [31] H. Steffan, *Unfallmechanik im Verkehrswesen*, TU Graz: TU Graz - Institut für Fahrzeugsicherheit (VSI), 2019.
- [32] H. Kolk, E. Tomasch, W. Sinz, J. Bakker und J. Dobberstein, „Evaluation of a momentum based impact model and application in an effectivity study considering junction accidents,“ Bremen, Fachverlag NW, Juni 2017.
- [33] The MathWorks, Inc., „MATLAB R2019b Documentation,“ The MathWorks, Inc., [Online]. Available: <https://de.mathworks.com/help/matlab/>. [Zugriff am 11. 01. 2020].
- [34] L. Wågström, A. Leledakis, J. Östh, M. Lindman, L. Jakobsson und Volvo, „Wågström 1 INTEGRATED SAFETY : ESTABLISHING LINKS FOR A COMPREHENSIVE VIRTUAL TOOL CHAIN,“ 2019.
- [35] H. Johannsen, *Unfallmechanik und Unfallrekonstruktion*, 3., überarbeitete Auflage Hrsg., Wiesbaden: Springer Vieweg, 2013, p. 215.
- [36] Robert Bosch GmbH, „Front radar plus,“ [Online]. Available: https://www.bosch-mobility-solutions.com/media/global/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driver-assistance-systems/multi-camera-system/front-radar-plus/summary_front-radar-plus_en.pdf. [Zugriff am 11. 1. 2020].
- [37] Robert Bosch GmbH, „Chassis Systems Control - Stereo video camera,“ [Online]. Available: <https://www.bosch-mobility-solutions.com/media/global/products-and-services/passenger-cars-and-light-commercial-vehicles/driver-assistance-systems/lane-departure-warning/stereo-video-camera/product-data-sheet-stereo-video-camera.pdf>. [Zugriff am 11. 1. 2020].
- [38] B. Breuer und K. H. Bill, *Bremsenhandbuch*, 5th ed. Hrsg., Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2017.

Anhang A: Glossar der Grundbegriffe

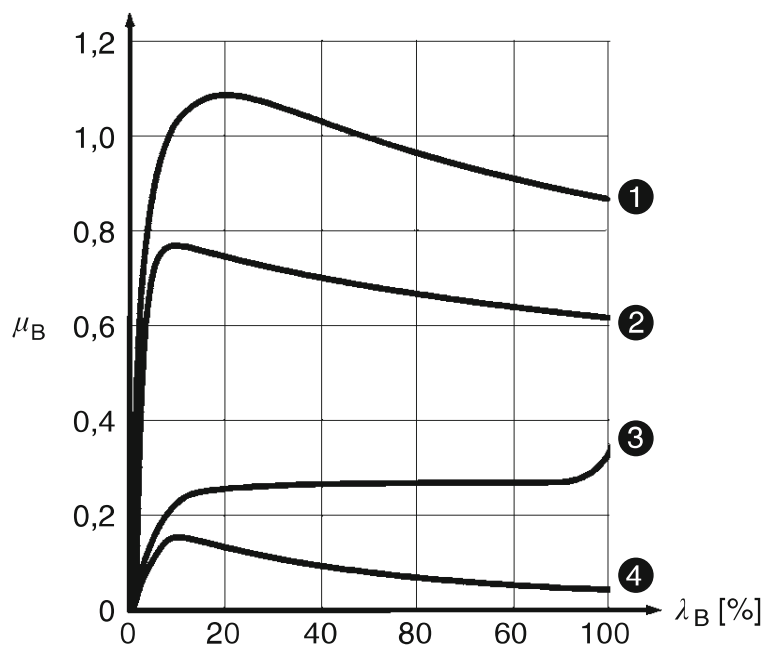
Begriff	Erklärungen/Definitionen
Unfalleinleitungsphase (Pre-Crashphase)	Darunter versteht man die Zeit vom Erfassen der kritischen Situation bis zum Erstkontakt mit dem Unfallgegner. In dieser Phase erkennt der Fahrer in der Regel die Gefahr und reagiert zum Beispiel durch eine starke Bremsung oder durch ein Lenkmanöver. In dieser Zeit können reversible Sicherheitssysteme die Unfallschwere mindern. [31]
Kollisionsphase (Crashphase)	Diese startet mit dem Erstkontakt des Unfallgegners und beinhaltet den Eindringvorgang. Je nach Unfall besteht diese Phase aus mindestens einer Kontaktphase- und einer Auslaufphase. In dieser Phase kommt es meist zu hohen Beschleunigungen, die Deformationen und Verletzungen zur Folge haben. Häufig leitet die Kollisionsphase einen Schleudervorgang ein. [31]
Unfallfolgephase (Post-Crashphase)	Diese Phase beinhaltet den Auslaufvorgang des Fahrzeugs bis zur Endlage. [31]
Bergungsphase (Rescue-Phase)	In dieser Phase findet die Bergung der Insassen statt. [31]
Energy Equivalent Speed (EES)	<p>EES ist ein Maß für die Unfallschwere in der Unfallforschung. Diese Kenngröße leitet sich von den äußeren Deformationen, welche eine Aussagekraft über die Energieabsorption liefern, ab. Der EES ist definiert als Geschwindigkeit eines Fahrzeugs (Masse m), welches bei einem geraden, vollplastischen ($k = 0$) und zentrischen Aufprall auf ein festes, beliebig geformtes und undeformierbares Hindernis die gleiche bleibende Energieabsorption ($E-E'$) besitzt wie das Unfallfahrzeug. [35]</p> $E - E' = W_{def} = \frac{1}{2} * m * EES^2 [J] \quad \text{Formel 9-1: Ermittlung des EES [35]}$ <p>Der Wert kann mit entsprechender Erfahrung mit einer Genauigkeit von ± 5 km/h geschätzt werden oder aus Energierastern ermittelt werden. [35]</p>
Kollisionsbedingte Änderung der Geschwindigkeit (delta-v)	<p>Die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung beschreibt die Differenz der betragsmäßigen Geschwindigkeitsänderung und ermittelt sich im ortsfesten x,y-Koordinatensystem wie folgt: [2]</p> $\Delta v = \sqrt{\Delta v_x^2 + \Delta v_y^2} [km/h] \quad \text{Formel 9-2: Ermittlung des delta-v [2]}$

	<p>Delta-v ist bei einem geraden, vollplastischen und zentrischen Stoß gegen ein starres Hindernis ident mit dem EES. Betrachtet man den Fall eines vollelastischen Stoßes entspricht delta-v der doppelten Kollisionsgeschwindigkeit. Der EES-Wert ist aufgrund dessen, dass keine Deformation stattfindet, null. [2]</p> <p>Diese beiden Kenngrößen können sich also gravierend voneinander unterscheiden. Der Unterschied steigt je exzentrischer und elastischer der Stoß wird. Daher ist keine der beiden Kenngrößen einzeln betrachtet der geeigneteren Wert um eine Aussage über die Unfallschwere zu treffen. [2]</p>
<p>Time To Collision (TTC)</p>	<p>Eine zentrale Kontrollgröße, ob ein Notbremssystem die Notbremsung initiieren soll oder nicht, stellt die Time To Collision (TTC) dar. Diese berechnet sich wie folgt: [4]</p> $TTC = \frac{d}{v_{rel}} [s]$ <p style="text-align: right;">Formel 9-3: Ermittlung des TTC [4]</p> <p>TTC gibt das Verhältnis zwischen dem Abstand zum anderen Objekt (d) und der relativen Geschwindigkeit beider Objekte zueinander (v_{rel}) an. Die Ermittlung des TTC erfolgt über die Auswertung der Daten aus der Umfeldsensorik. Im Kapitel 2.3.3 wird dies beispielhaft anhand eines Kamerasystems erläutert. [4]</p>
<p>Field of View (FoV)</p>	<p>Der „Field of View“ ist ein wichtiger Parameter für die Umfelderkennung und beschreibt den Arbeitsbereich eines Systems zur Umfelderkennung. Es wird zwischen dem horizontalen und dem vertikalen Sichtbereich unterschieden. Der horizontale Wert ist von größerer Bedeutung. [4] Beim Notbremssystem der Robert Bosch GmbH beträgt der horizontale Sichtbereich beim Radarsystem $\pm 60^\circ$ [36] und beim Kamerasystem 50°. [37]</p>
<p>Bremsschlupf</p>	<p>Aufgrund der Eigenschaften des Reifens kann eine Kraftübertragung nur funktionieren, wenn ein Gleitschlupf vorliegt. Im Fall einer Bremsung ist die Radumfanggeschwindigkeit des gebremsten Rades kleiner als die des Fahrzeugs. Dieser Zusammenhang wird in Längsrichtung durch den Bremsschlupf λ_B beschrieben [5]:</p> $\lambda_B = \frac{(v_F - v_U)}{v_F} * 100\%$ <p style="text-align: right;">Formel 9-4: Ermittlung des Bremsschlupf [5]</p>

	<p>Dabei steht v_F für die Fahrzeuggeschwindigkeit, v_U für die Radumfangsgeschwindigkeit. Bei einem blockierenden Rad beträgt der Bremsschlupf 100%. [5]</p>
Bremskraftbeiwert	<p>Die tatsächlich übertragbare Bremskraft wird in Längsrichtung über den Bremskraftbeiwert μ_B beschrieben, welcher als Verhältnis der Radbremskraft F_B zur Radaufstandskraft F_A definiert ist: [5]</p> $\mu_B = \frac{F_B}{F_A} \quad \text{Formel 9-5: Ermittlung des Bremskraftbeiwertes [5]}$ <p>Wird der Bremskraftbeiwert μ_B als Funktion des Bremsschlupf λ_B betrachtet, kann der funktionale Zusammenhang beider dargestellt werden, siehe Abbildung 9-1. Unabhängig von den Fahrbahnbedingungen besitzen die Funktionen einen ähnlichen Verlauf. Zunächst steigen die Kurven an und erreichen im Bereich von 8 bis 30% ihr Maximum. Dieser ansteigende Bereich wird auch als stabiler Bereich bezeichnet. In diesem Bereich bleibt das Fahrzeug weitestgehend sicher. Wird der kritische Schlupf überschritten, beginnt der instabile Bereich, bei welchem es in kürzester Zeit zum Blockieren des Rades kommt und zur Instabilität des Fahrzeugs führt. [5]</p>
Seitenkraftbeiwert	<p>Bei der Seitenführungskraft kann ein ähnlicher Zusammenhang wie bei der Bremskraft beobachtet werden. Damit der Reifen Kräfte übertragen kann, ist Schlupf notwendig. Damit Schlupf vorhanden ist, muss die Bewegungsrichtung des Mittelpunkts vom Rad von der Längsrichtung des Rades abweichen. Der Winkel, welcher sich zwischen den beiden Größen einstellt, wird als Schräglaufwinkel α bezeichnet. Der Seitenkraftbeiwert μ_S wird als Verhältnis der Seitenführungskraft F_S zur Radaufstandskraft F_A berechnet. [5]</p> $\mu_S = \frac{F_S}{F_A} \quad \text{Formel 9-6: Ermittlung des Seitenkraftbeiwertes [5]}$ <p>Bei der Betrachtung des Seitenkraftbeiwerts und des Bremskraftbeiwerts in Abhängigkeit vom Bremsschlupf ist ersichtlich, dass bei steigendem Schräglaufwinkel die Fähigkeit Seitenführungskräfte zu übertragen stark ansteigt. Dies bewirkt eine Minderung der Fähigkeit Bremskräfte zu übertragen. Abbildung 9-2 stellt diesen Zusammenhang bei einem Schräglaufwinkel von 2° und 5° exemplarisch dar. [5]</p>

Kamm'scher Reibungskreis	<p>Der Zusammenhang zwischen Seitenführungskraft und Bremskraft wird in vereinfachter Form durch den Kamm'schen Reibungskreis beschrieben. Die Umfangskraft F_B und die Seitenführungskraft F_S werden vektoriell zu einer Gesamtkraft addiert:</p> $F_{MAX} = \sqrt{F_B^2 + F_S^2} \quad \text{Formel 9-7: Ermittlung der Gesamtkraft [38]}$ <p>Der Betrag der vektoriellen Summe darf nicht größer sein als die Maximalkraft F_{max}, welche abhängig vom Schlupf ist, siehe Abbildung 9-3 [38]</p>
-------------------------------------	--

Abbildungen zu den Erklärungen/Definitionen



λ_B Bremsschlupf, μ_B Bremskraftbeiwert, 1 trockener Asphalt, 2 nasser Asphalt, 3 Neuschnee, 4 Eis

Abbildung 9-1: Bremskraftbeiwertverlauf in Abhängigkeit des Fahrbahnzustands [5]

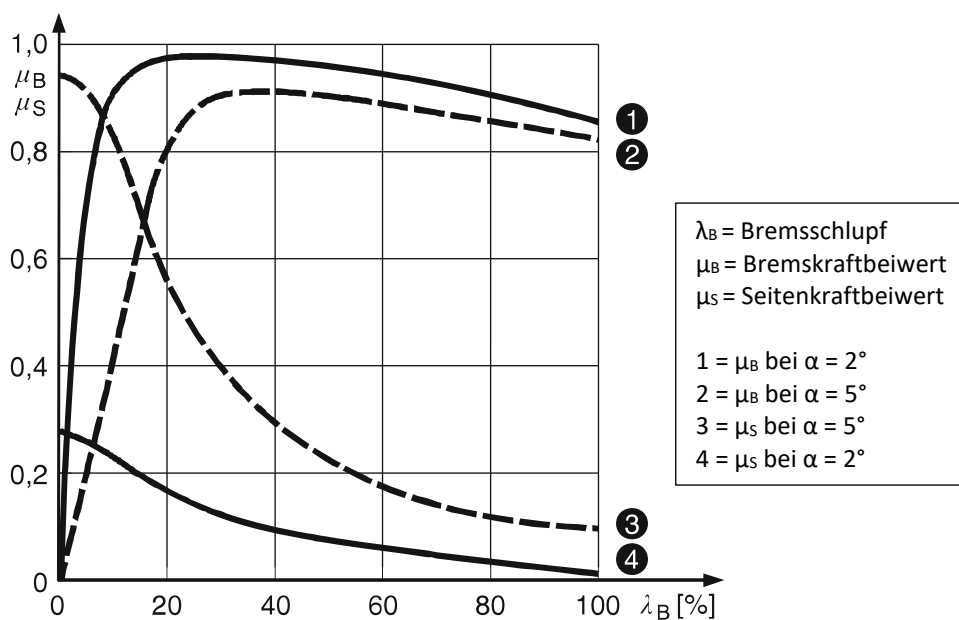
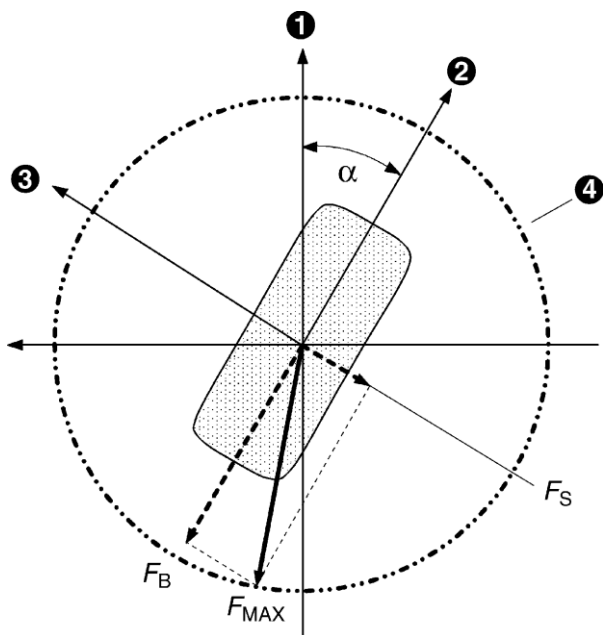


Abbildung 9-2: Brems- und Seitenkraftbeiwertverlauf (trockene Betonfahrbahn) [5]



F_{max}	Maximal übertragbare Kraft
F_s	Seitenführungskraft
α	Schräglaufwinkel
1	Bewegungsrichtung des Radmittelpunktes
2	Längsrichtung des Rades
3	Querrichtung des Rades
4	Kamm'scher Reibungskreis

Abbildung 9-3: Kamm'scher Reibungskreis [5]

Anhang B: Ergebnisse

B.1 Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen

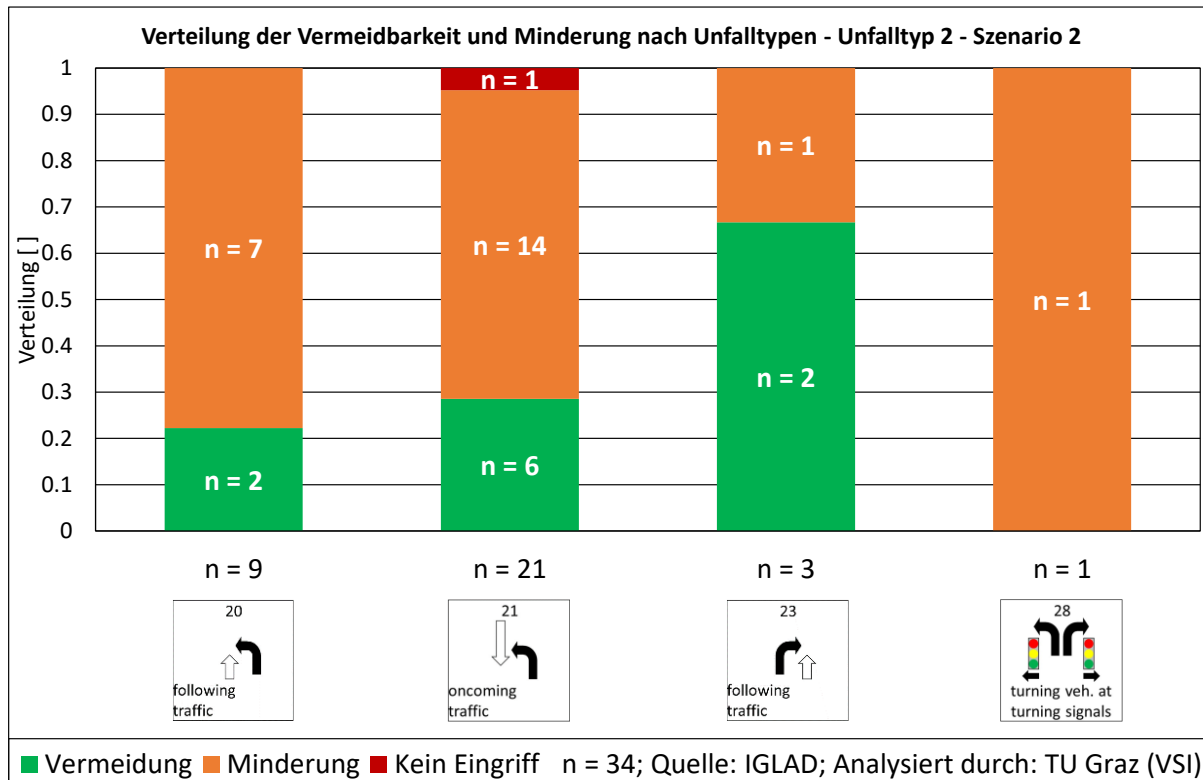


Abbildung 9-4: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 2 - Szenario 2

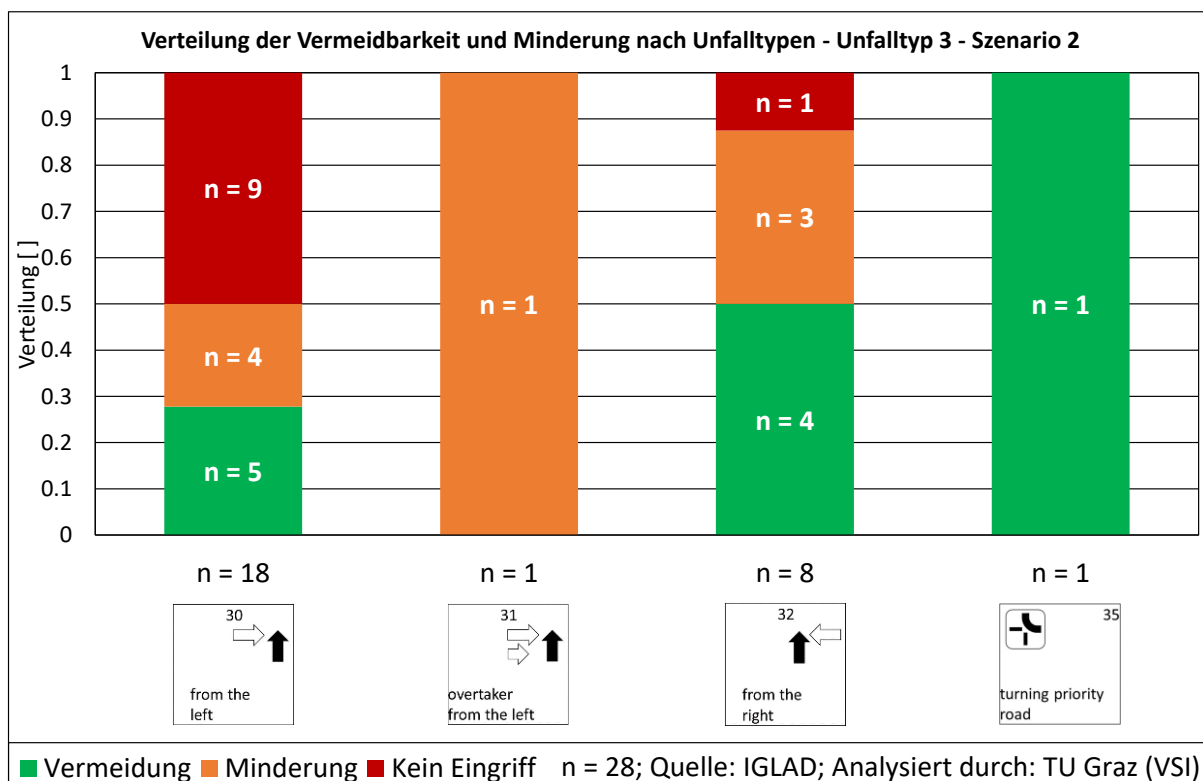


Abbildung 9-5: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 3 - Szenario 2

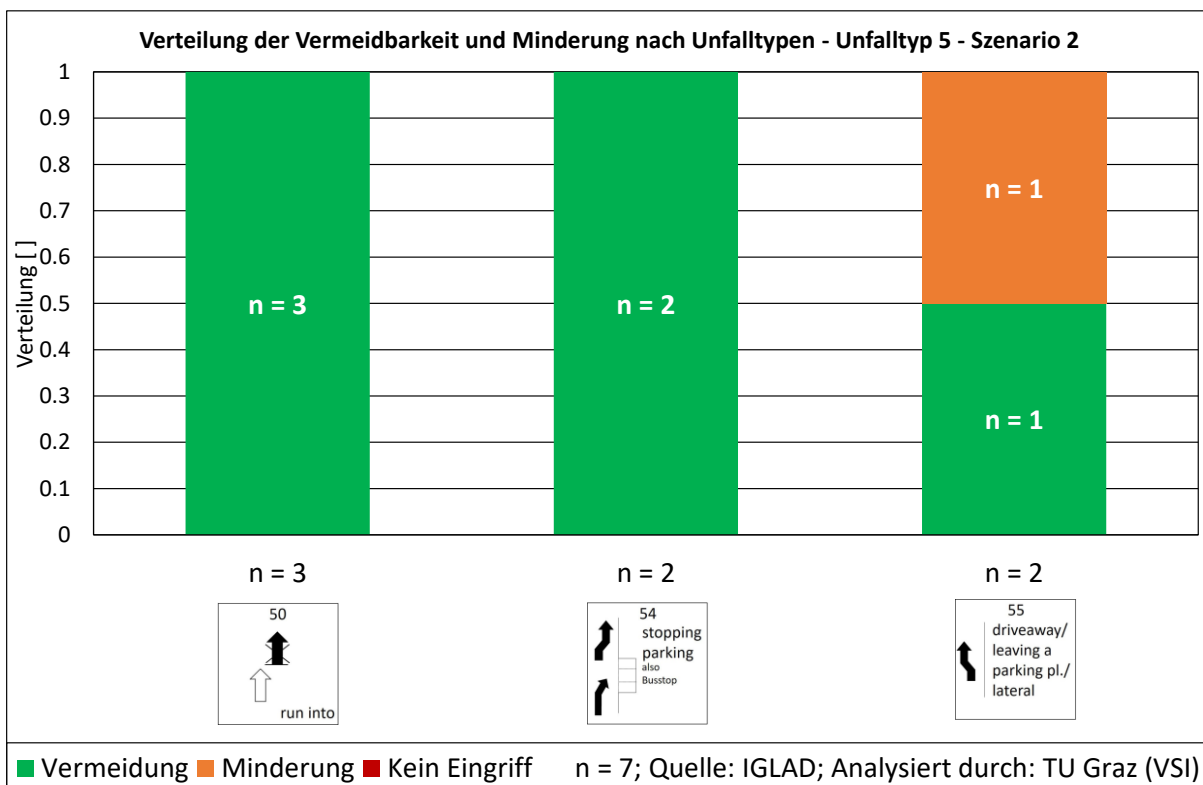


Abbildung 9-6: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 5 - Szenario 2

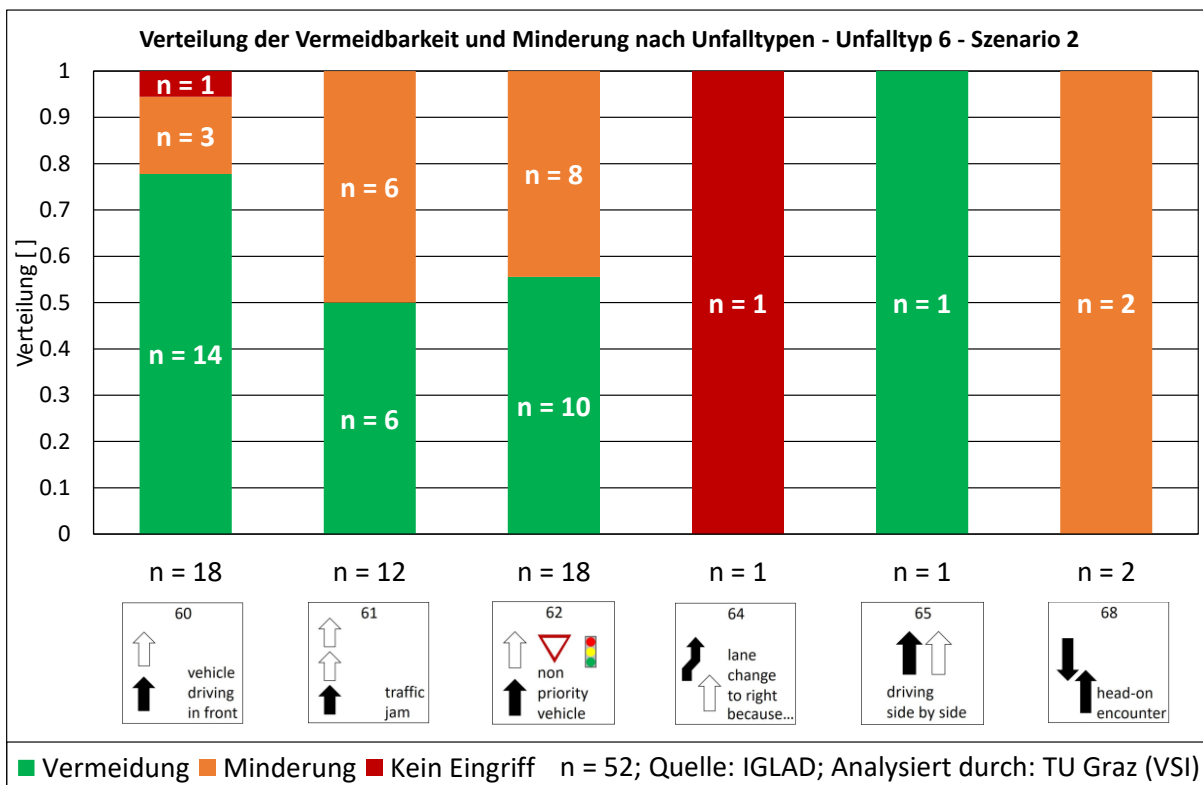


Abbildung 9-7: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 6 - Szenario 2

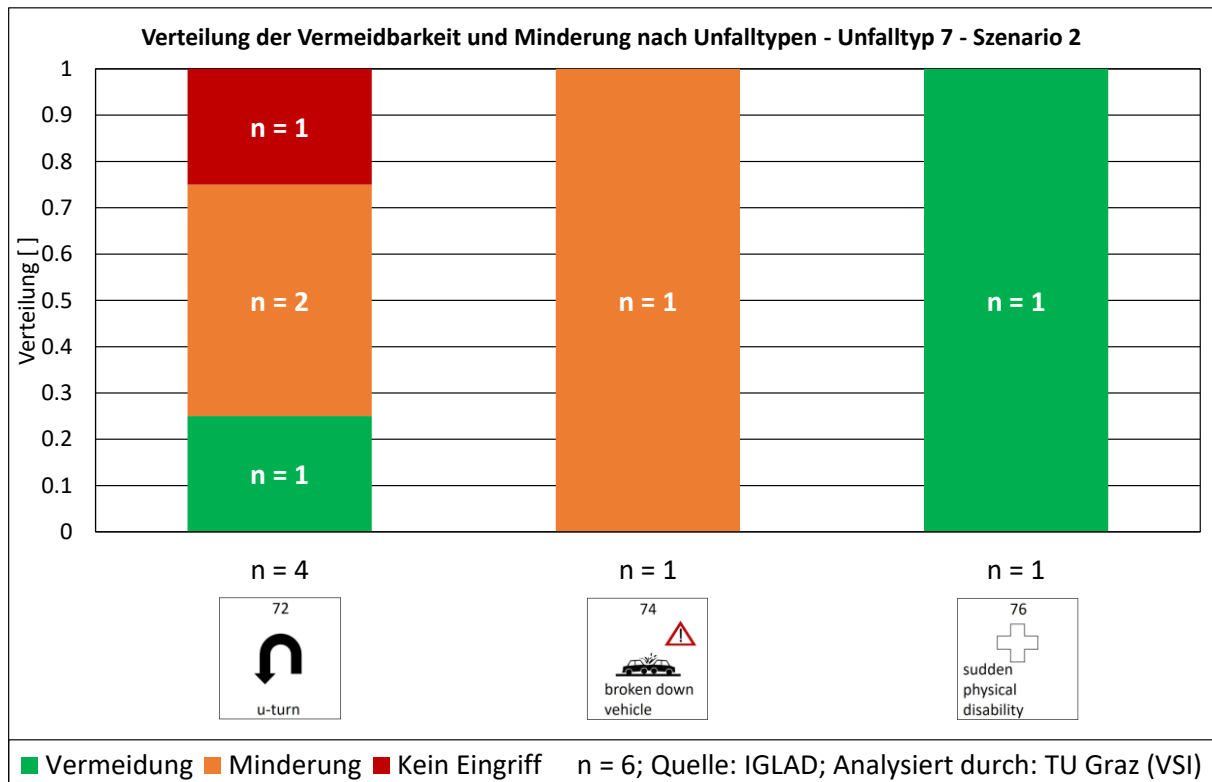


Abbildung 9-8: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 7 - Szenario 2

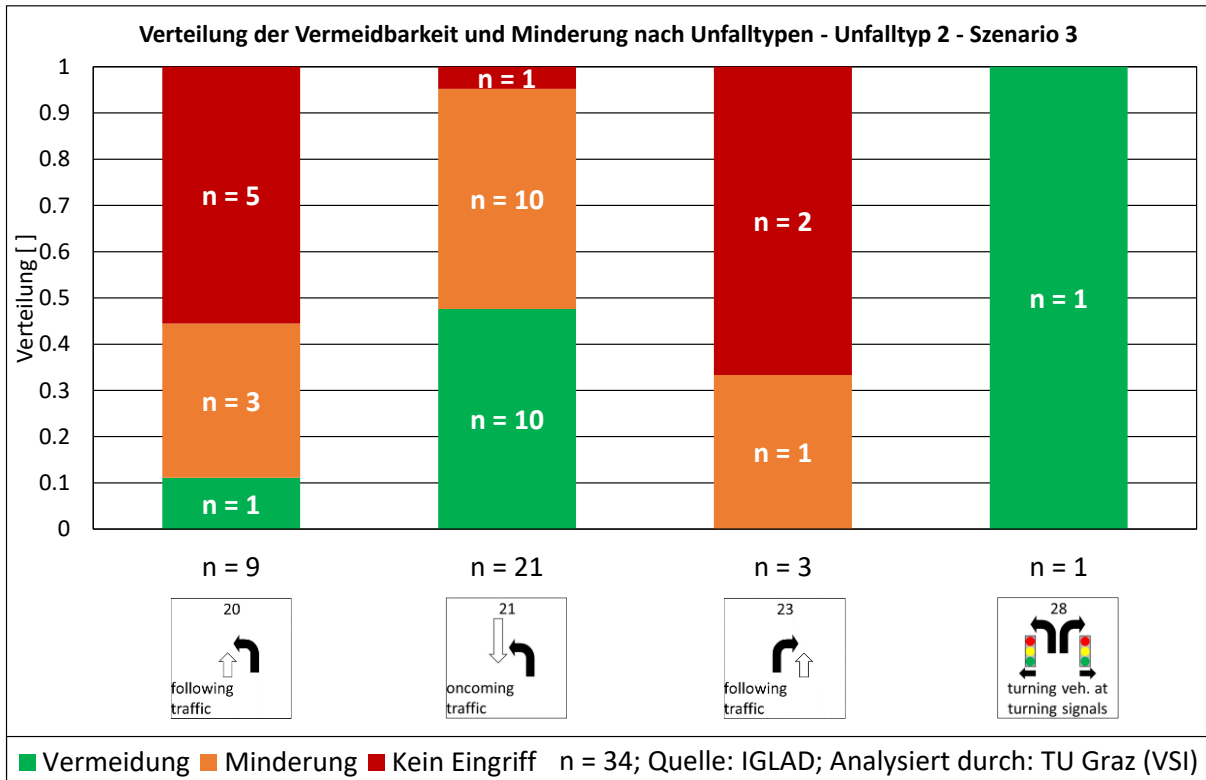


Abbildung 9-9: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 2 - Szenario 3

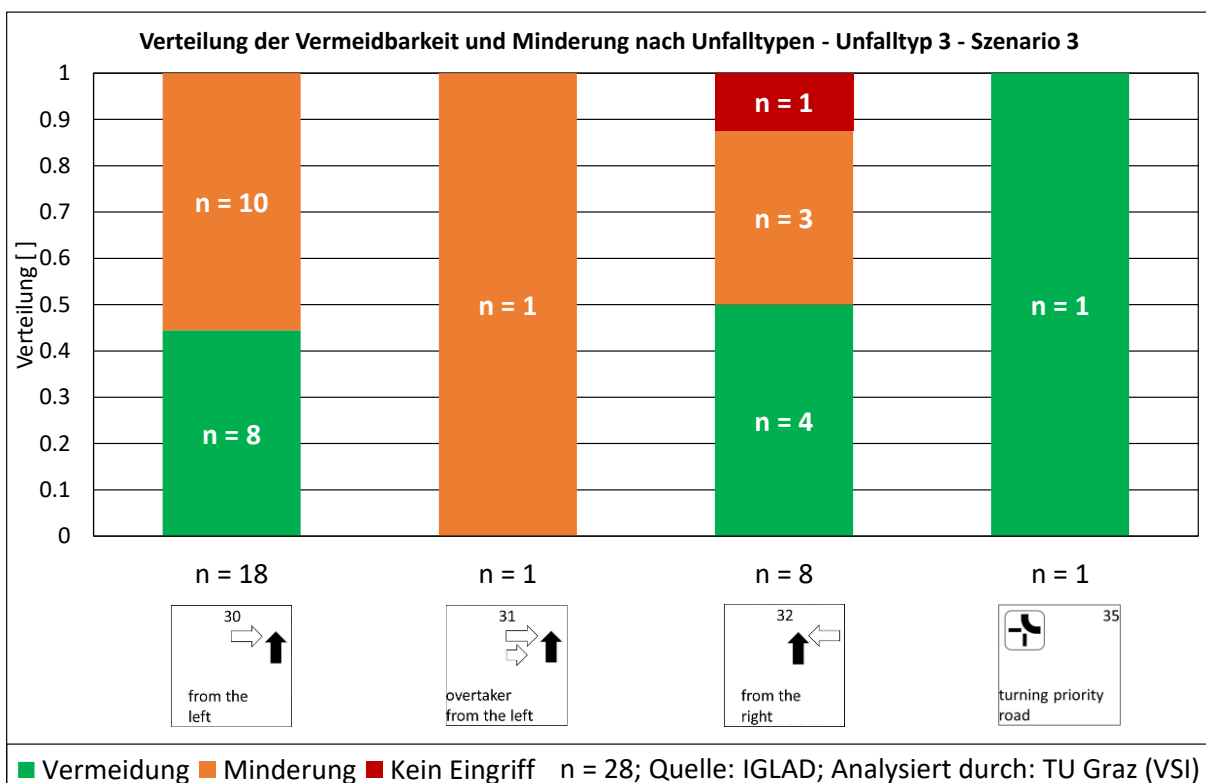


Abbildung 9-10: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 3 - Szenario 3

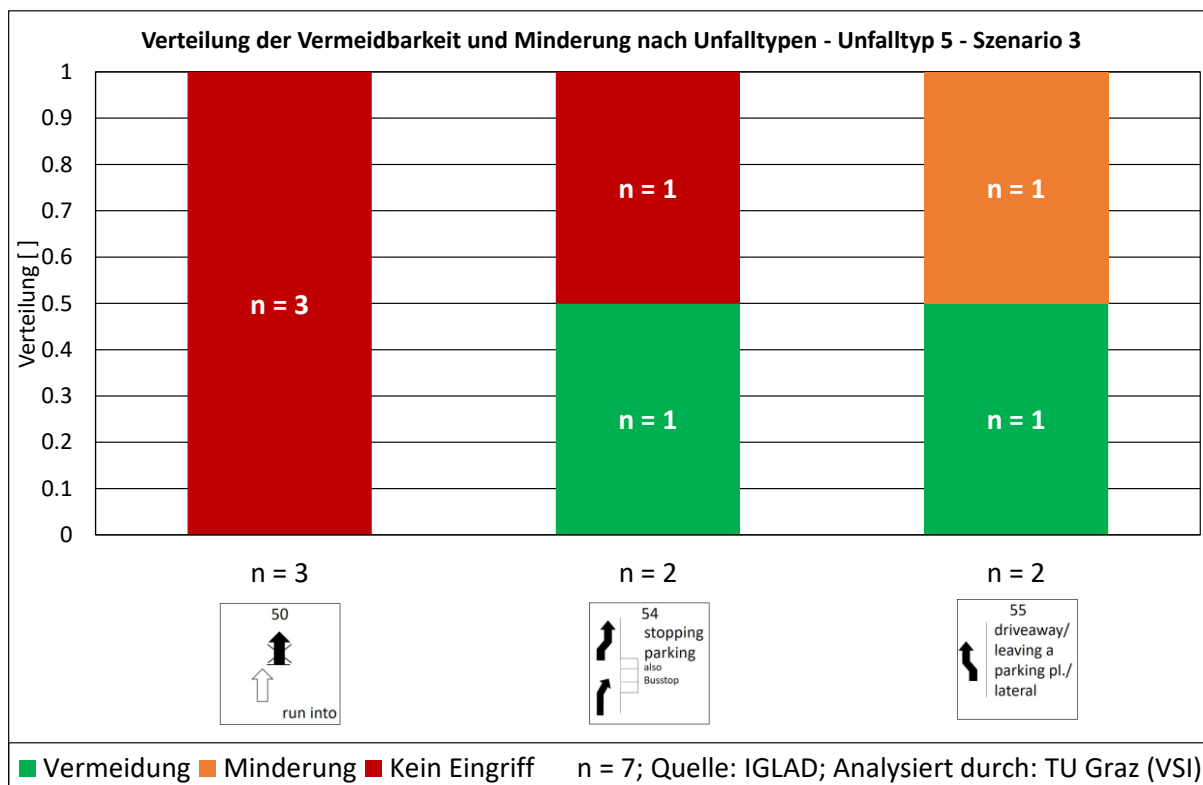


Abbildung 9-11: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 5 - Szenario 3

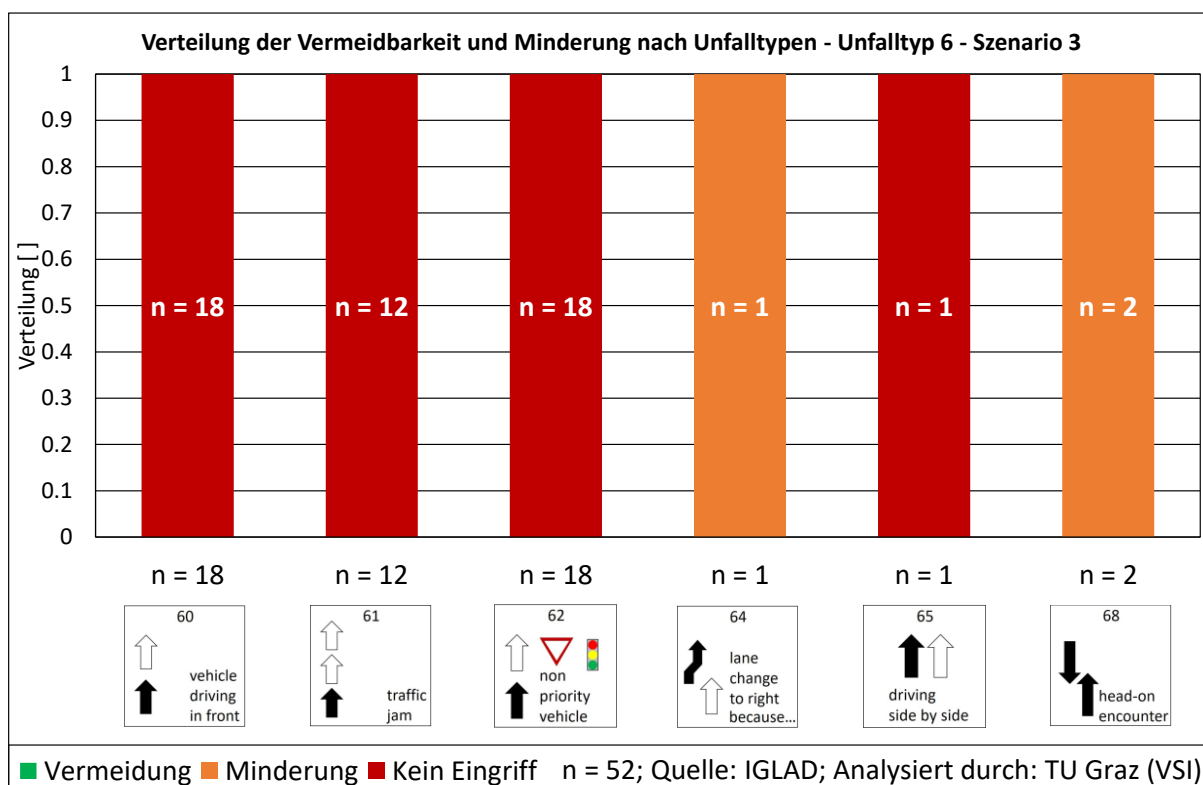


Abbildung 9-12: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 6 - Szenario 3

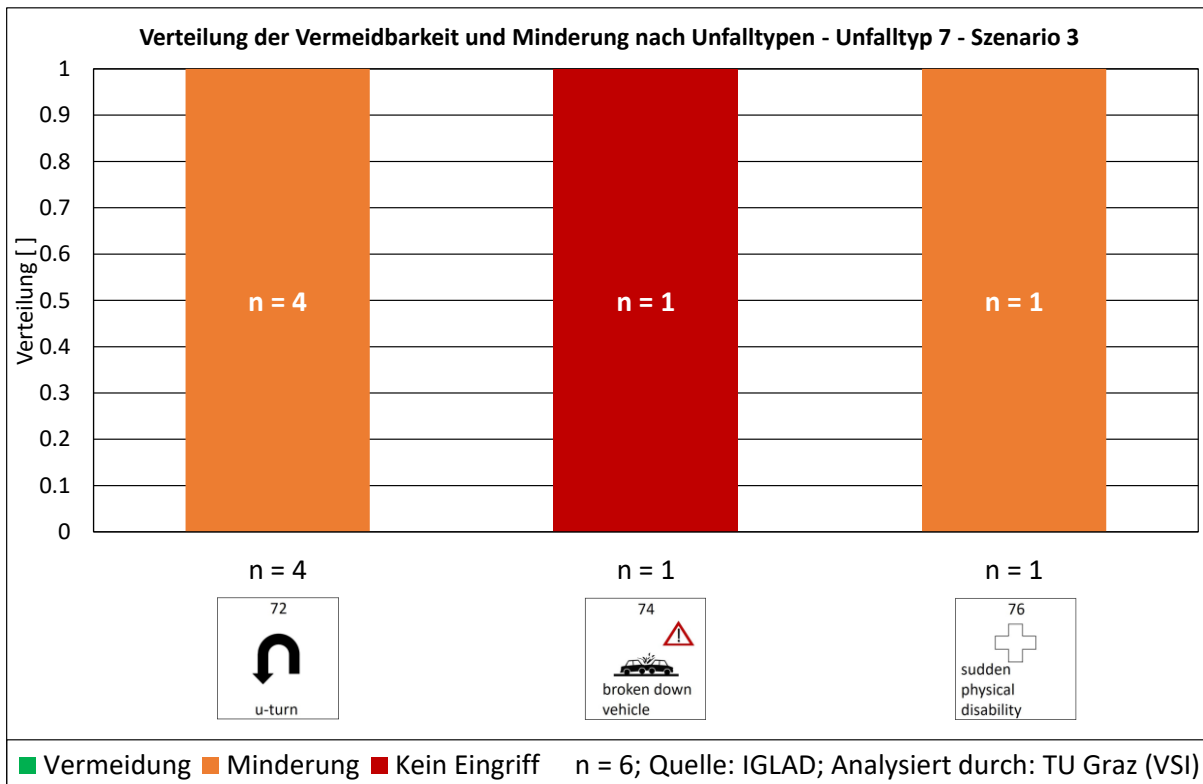


Abbildung 9-13: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 7 - Szenario 3

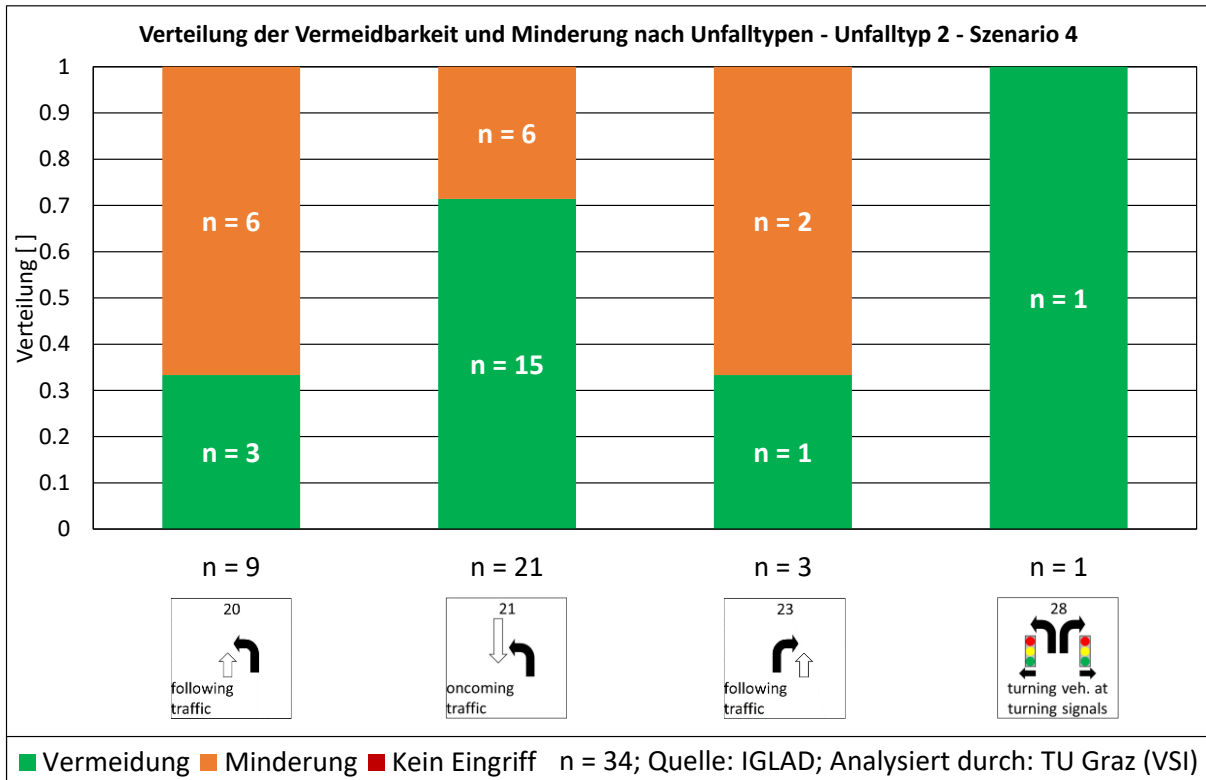


Abbildung 9-14: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 2 - Szenario 4

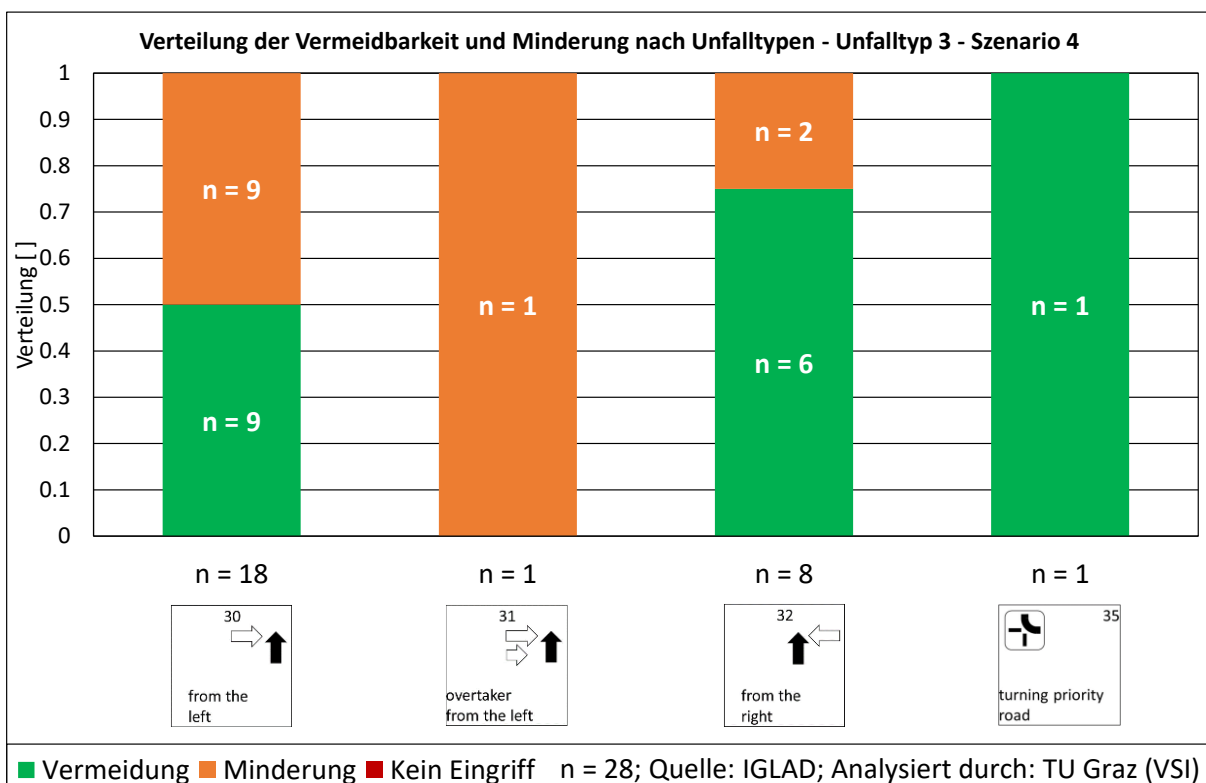


Abbildung 9-15: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 3 - Szenario 4

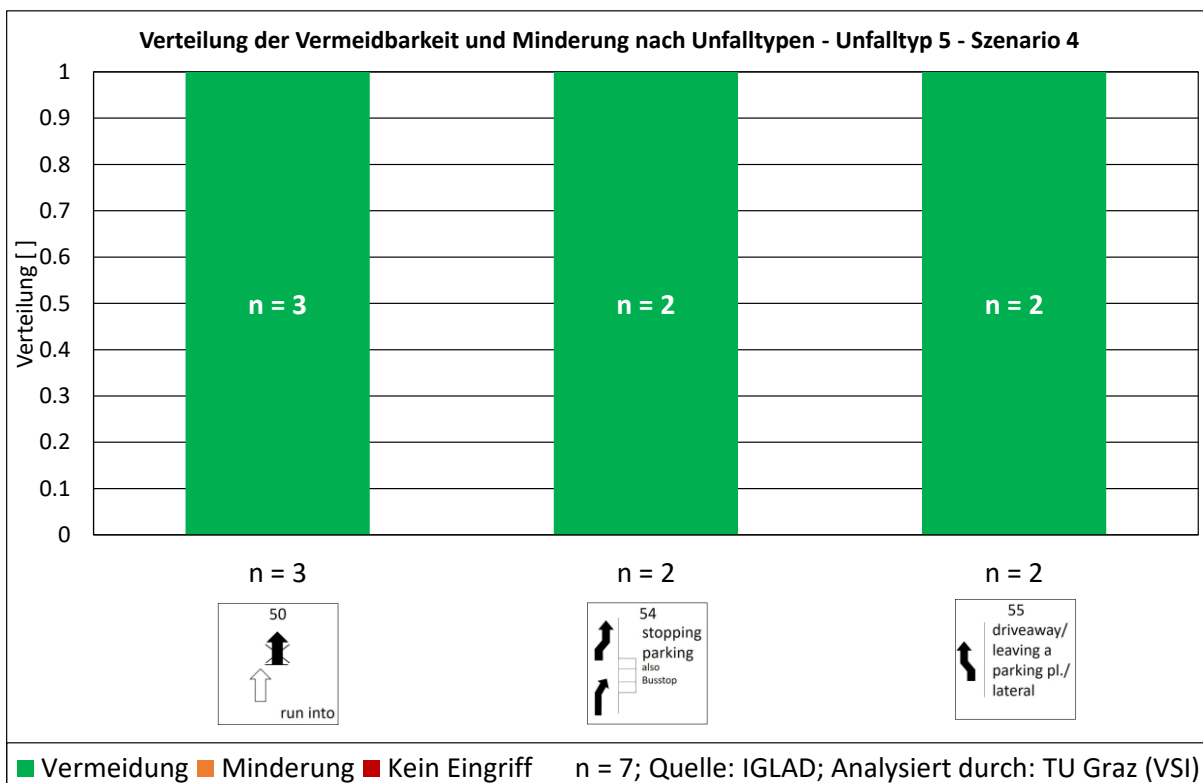


Abbildung 9-16: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 5 - Szenario 4

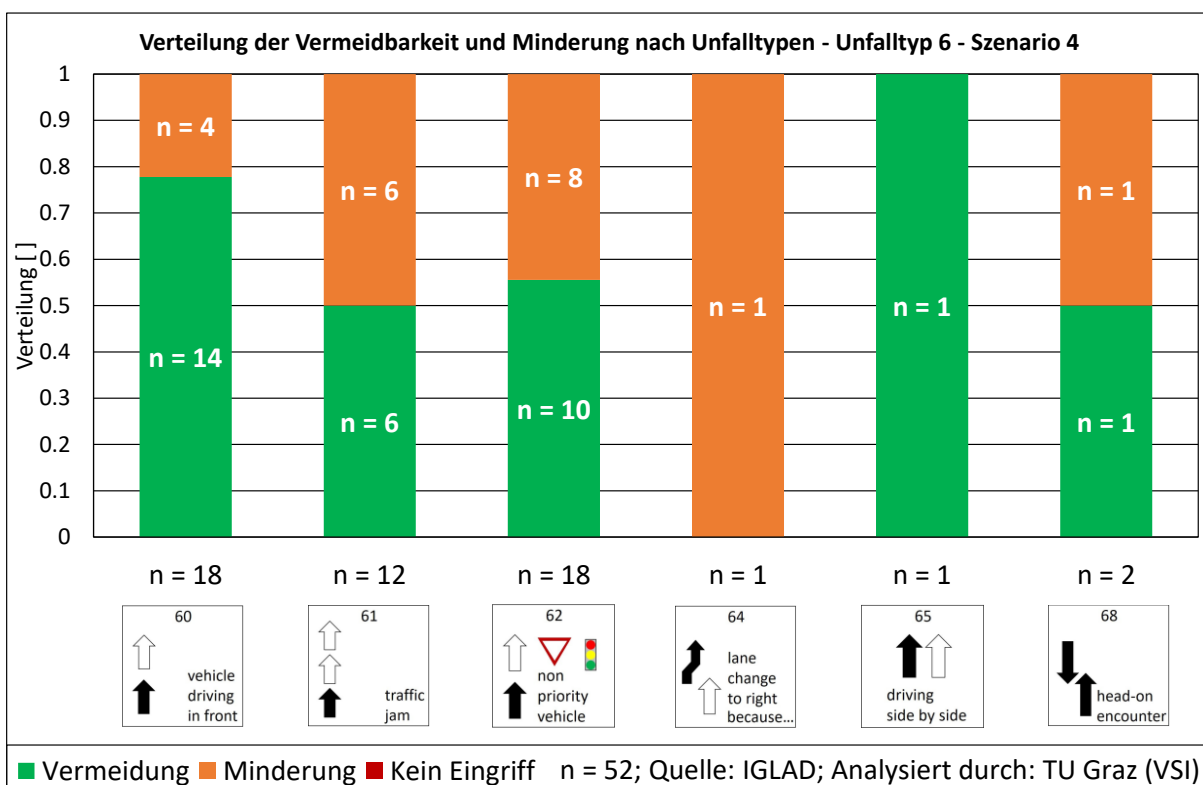


Abbildung 9-17: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 6 - Szenario 4

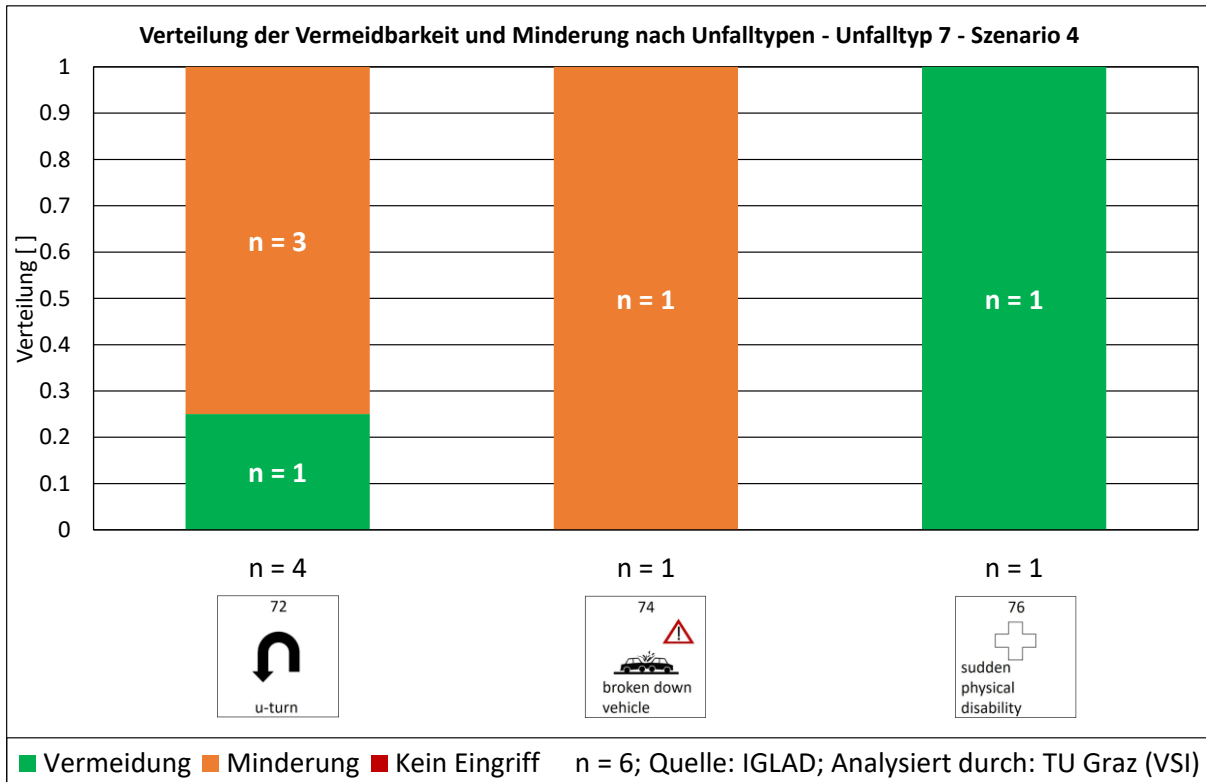


Abbildung 9-18: Vermeidbarkeit und Minderung nach Unfalltypen - Unfalltyp 7 - Szenario 4

B.2 Kollisionsgeschwindigkeit

B.2.1 Box-Plot und statistische Kennwerte

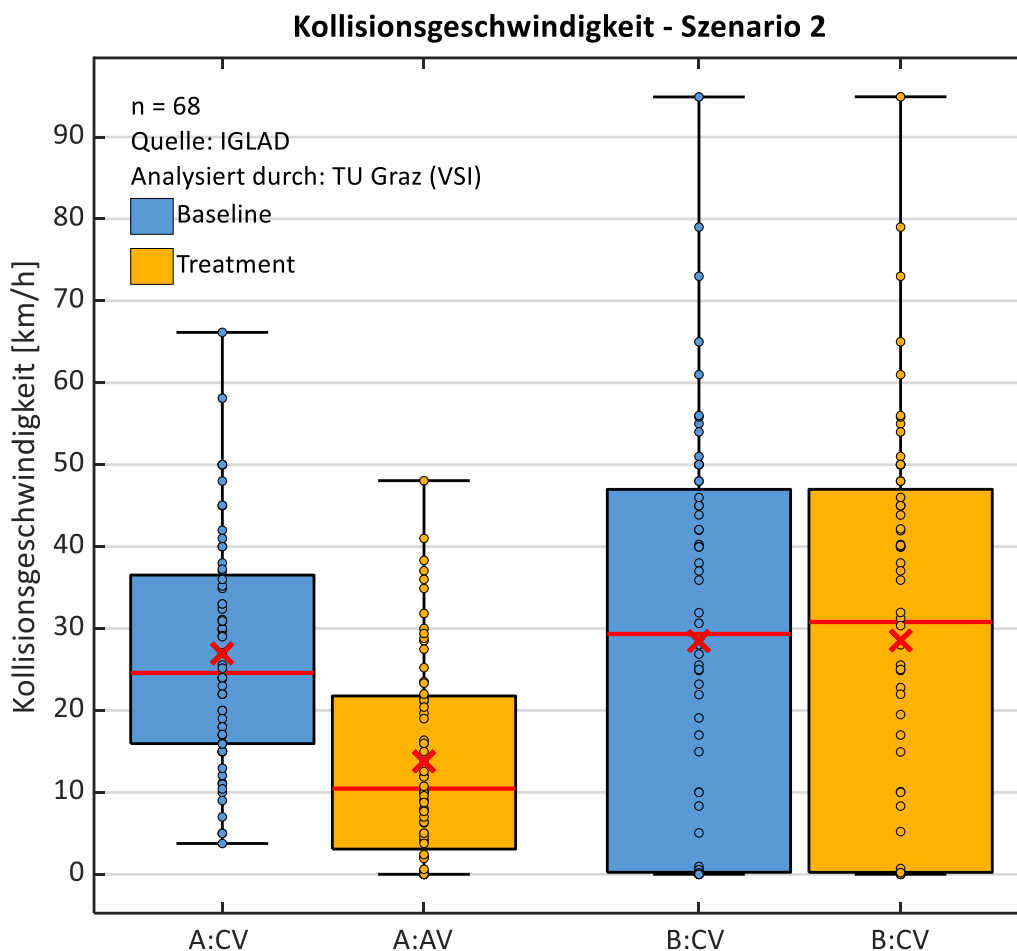


Abbildung 9-19: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 2

Tabelle 9-1: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 2

Kollisionsgeschwindigkeit - Szenario 2				
	A:BL	A:AV	B:BL	B:CV
Number n []	68	68	68	68
Median [km/h]	24,6	10,5	29,3	30,8
Mean Value [km/h]	27,0	13,8	28,5	28,5
Standard deviation [km/h]	14,0	12,2	24,0	24,0
Variance [(km/h) ²]	195,0	149,8	576,4	576,5
Minimum [km/h]	3,8	0,0	0,0	0,0
Maximum [km/h]	66,2	48,1	94,9	94,9

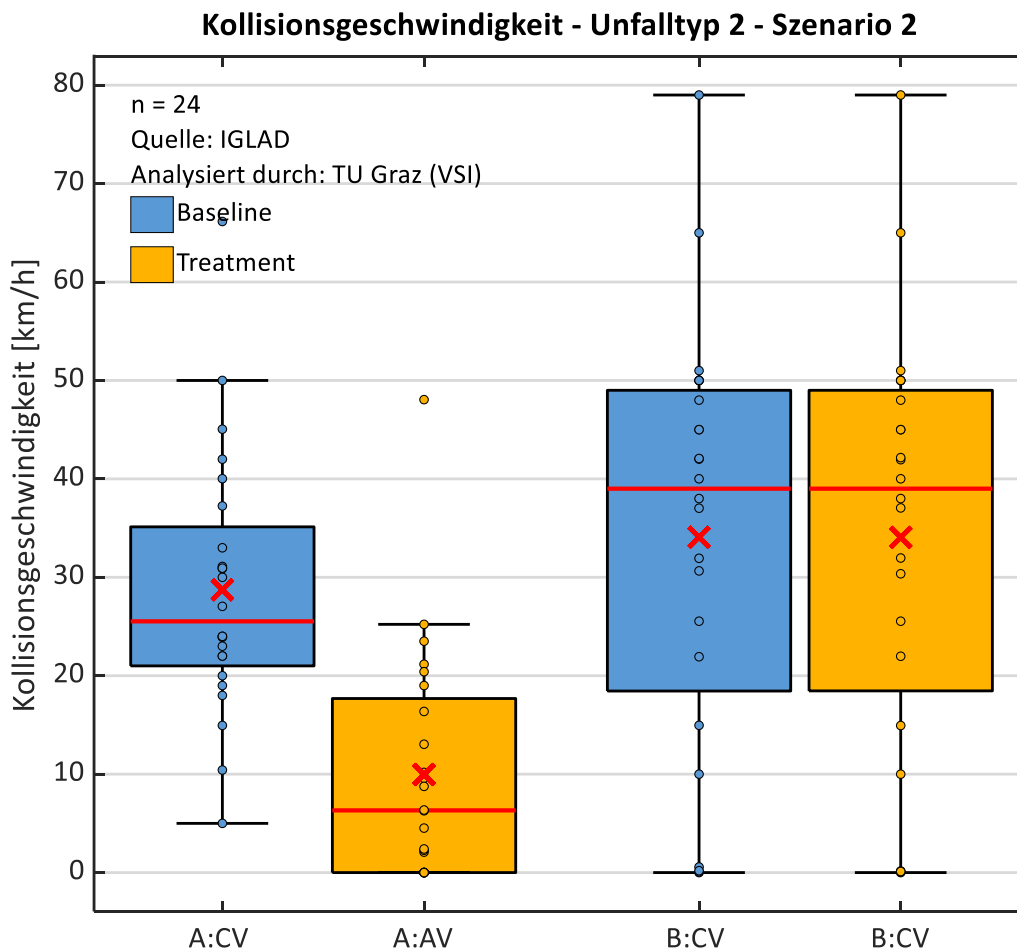


Abbildung 9-20: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 2 – Szenario 2

Tabelle 9-2: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 2 – Szenario 2

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 2 - Szenario 2				
	A:BL	A:AV	B:BL	B:CV
Number n []	24	24	24	24
Median [km/h]	25,5	6,3	39,0	39,0
Mean Value [km/h]	28,7	10,0	34,1	34,1
Standard deviation [km/h]	13,3	11,7	21,3	21,3
Variance [(km/h)^2]	178,2	137,6	452,6	454,1
Minimum [km/h]	5,0	0,0	0,0	0,0
Maximum [km/h]	66,2	48,1	79,0	79,0

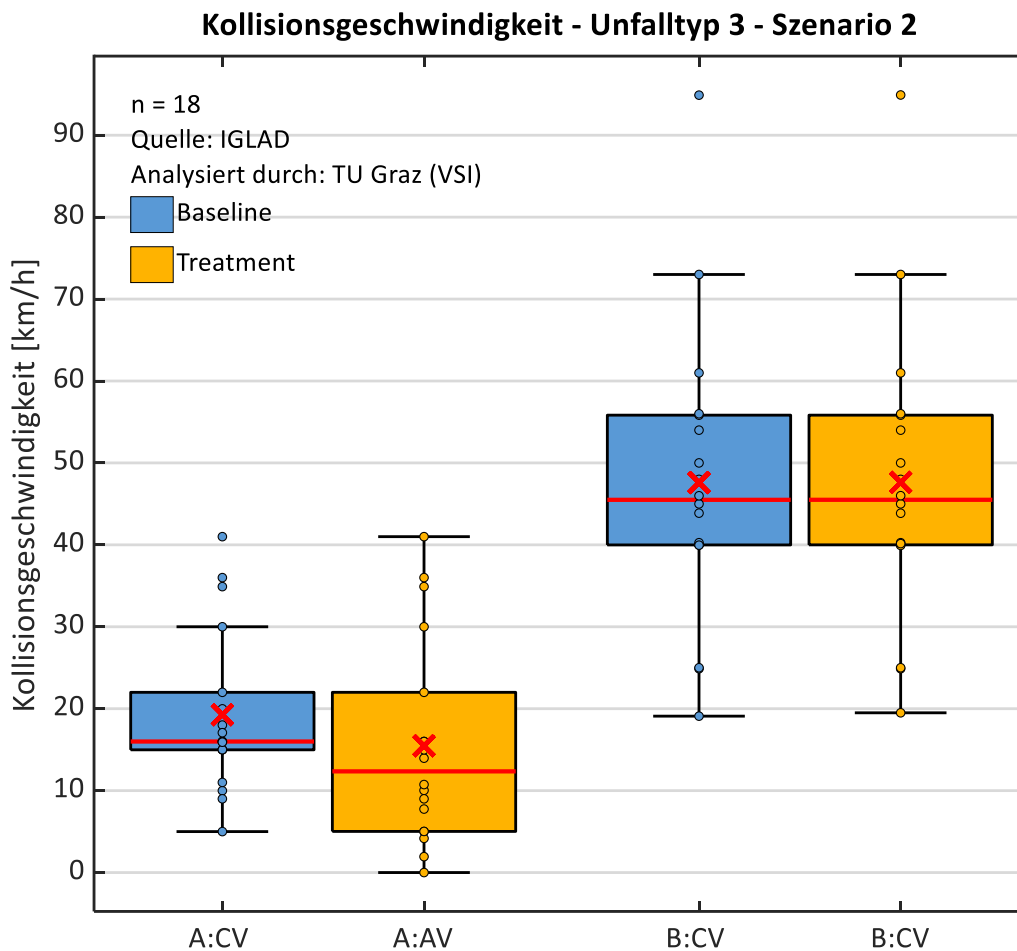


Abbildung 9-21: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 2

Tabelle 9-3: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 2

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 3 - Szenario 2				
	A:BL	A:AV	B:BL	B:CV
Number n []	18	18	18	18
Median [km/h]	16,0	12,4	45,5	45,5
Mean Value [km/h]	19,3	15,5	47,6	47,6
Standard deviation [km/h]	9,9	12,4	17,7	17,7
Variance [(km/h)^2]	98,7	154,7	313,9	312,6
Minimum [km/h]	5,0	0,0	19,1	19,5
Maximum [km/h]	41,0	41,0	94,9	94,9

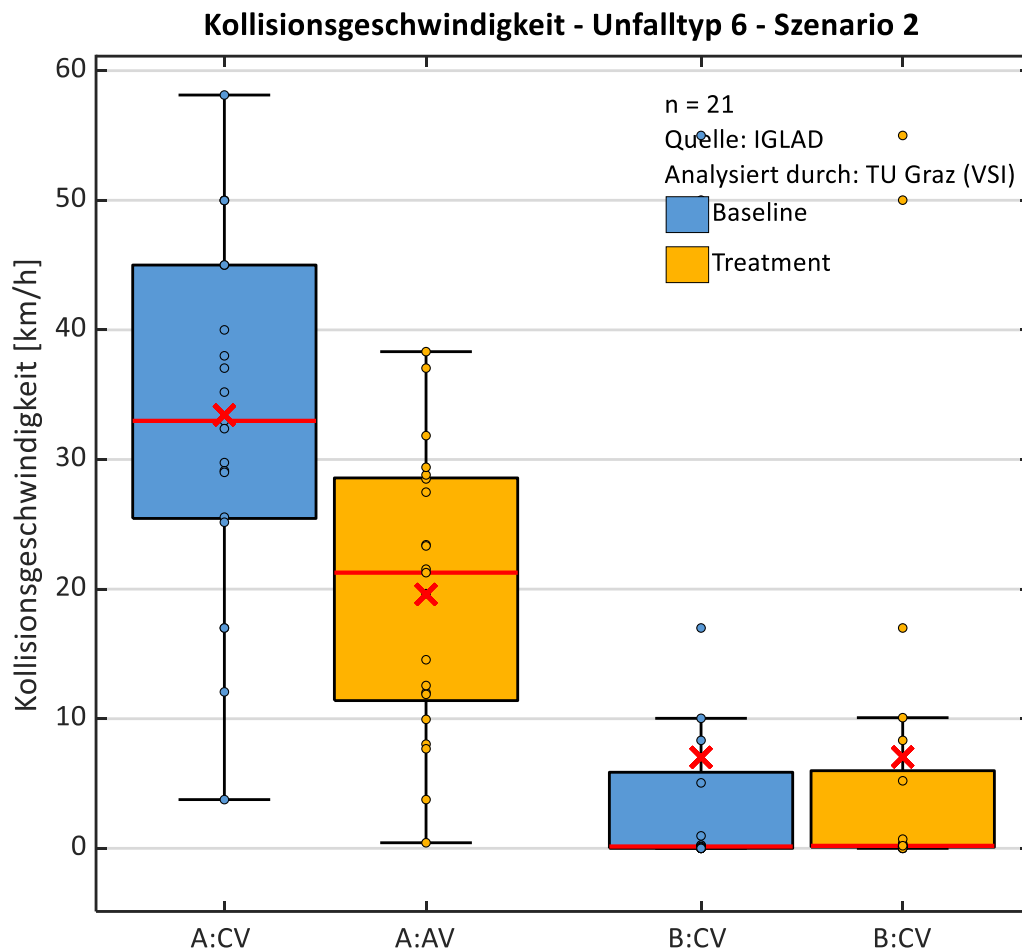


Abbildung 9-22: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 6 – Szenario 2

Tabelle 9-4: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 6 – Szenario 2

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 6 - Szenario 2				
	A:BL	A:AV	B:BL	B:CV
Number n []	21	21	21	21
Median [km/h]	33,0	21,3	0,1	0,2
Mean Value [km/h]	33,4	19,6	7,0	7,1
Standard deviation [km/h]	13,9	10,8	15,8	15,8
Variance [(km/h) ²]	192,0	117,1	248,8	248,5
Minimum [km/h]	3,8	0,4	0,0	0,0
Maximum [km/h]	58,1	38,3	55,0	55,0

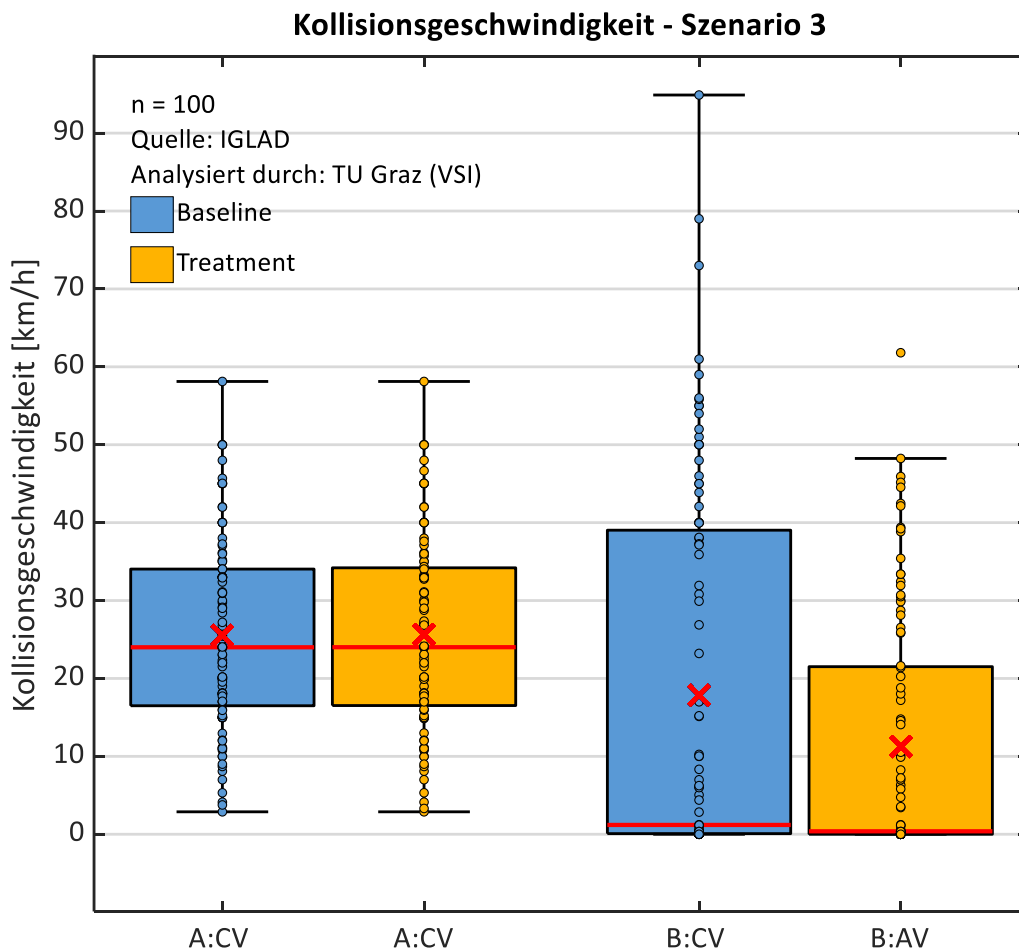


Abbildung 9-23: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 3

Tabelle 9-5: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 3

Kollisionsgeschwindigkeit - Szenario 3				
	A:BL	A:CV	B:BL	B:AV
Number n []	100	100	100	100
Median [km/h]	24,0	24,0	1,2	0,4
Mean Value [km/h]	25,5	25,6	17,9	11,3
Standard deviation [km/h]	12,3	12,3	23,5	15,7
Variance [(km/h) ²]	150,8	151,8	554,1	245,7
Minimum [km/h]	2,9	2,9	0,0	0,0
Maximum [km/h]	58,1	58,1	94,9	61,8

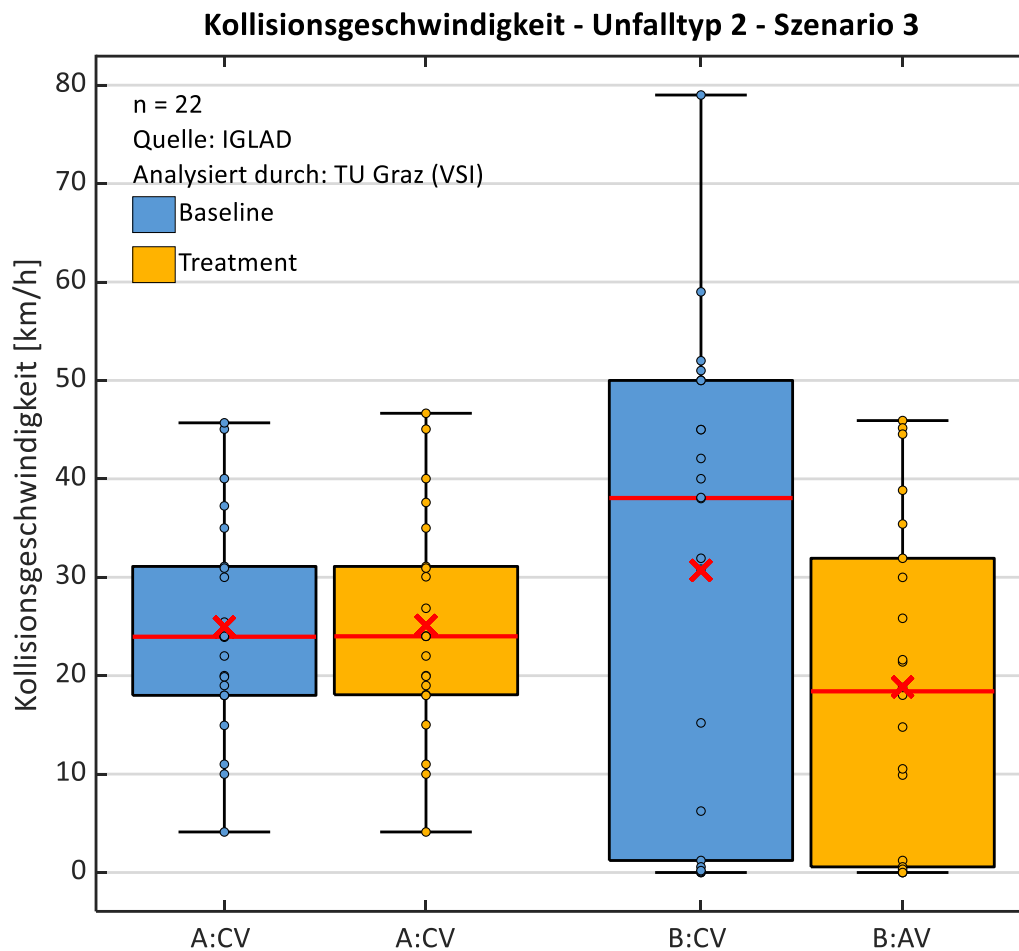


Abbildung 9-24: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 2 – Szenario 3

Tabelle 9-6: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 2 – Szenario 3

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 2 - Szenario 3				
	A:BL	A:CV	B:BL	B:AV
Number n []	22	22	22	22
Median [km/h]	24,0	24,0	38,1	18,4
Mean Value [km/h]	25,0	25,1	30,7	18,9
Standard deviation [km/h]	11,0	11,1	23,8	16,5
Variance [(km/h)^2]	121,8	124,2	564,2	271,0
Minimum [km/h]	4,1	4,1	0,0	0,0
Maximum [km/h]	45,7	46,7	79,0	45,9

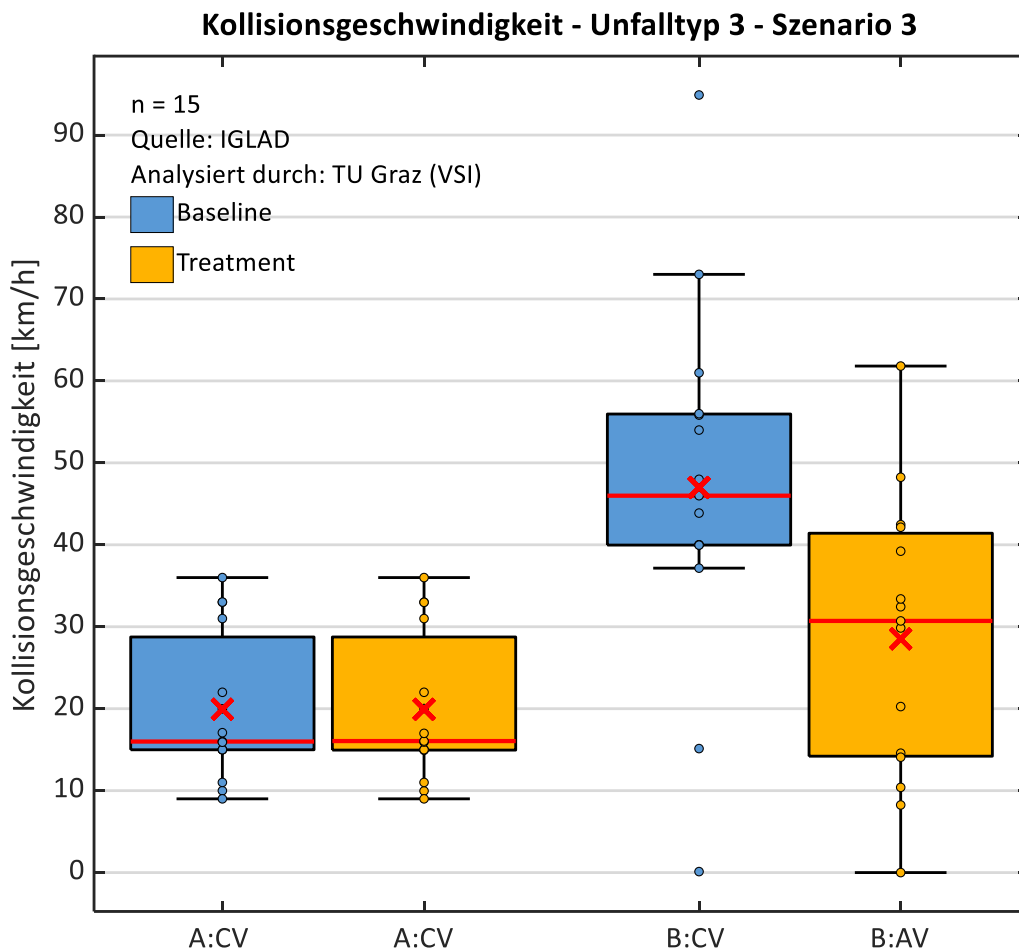


Abbildung 9-25: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 3

Tabelle 9-7: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 3

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 3 - Szenario 3				
	A:BL	A:CV	B:BL	B:AV
Number n []	15	15	15	15
Median [km/h]	16,0	16,1	46,0	30,7
Mean Value [km/h]	19,9	19,9	47,0	28,5
Standard deviation [km/h]	9,0	9,0	22,1	17,0
Variance [(km/h)^2]	81,3	81,3	488,8	290,1
Minimum [km/h]	9,0	9,0	0,1	0,0
Maximum [km/h]	36,0	36,0	94,9	61,8

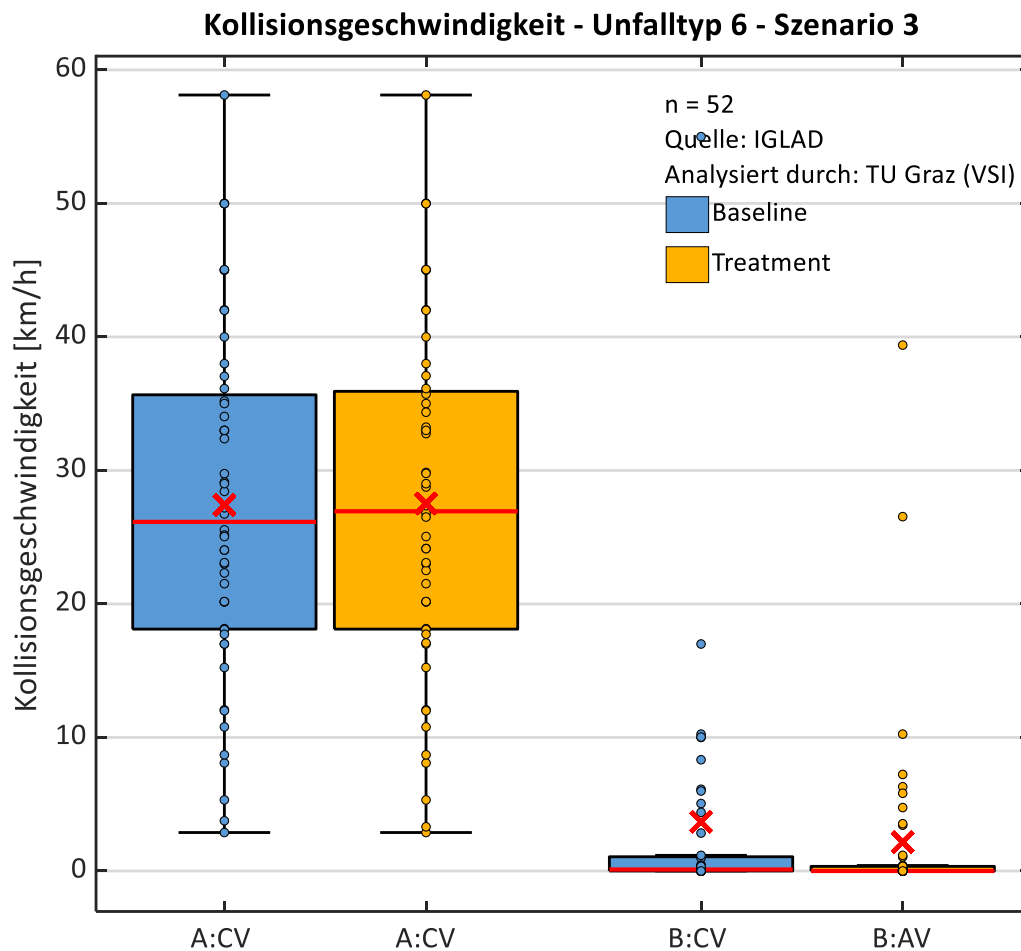


Abbildung 9-26: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 6 – Szenario 3

Tabelle 9-8: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 6 – Szenario 3

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 6 - Szenario 3				
	A:BL	A:CV	B:BL	B:AV
Number n []	52	52	52	52
Median [km/h]	26,1	26,9	0,1	0,0
Mean Value [km/h]	27,4	27,5	3,7	2,2
Standard deviation [km/h]	13,0	13,0	10,5	6,7
Variance [(km/h)^2]	168,8	169,4	110,2	45,0
Minimum [km/h]	2,9	2,9	0,0	0,0
Maximum [km/h]	58,1	58,1	55,0	39,4

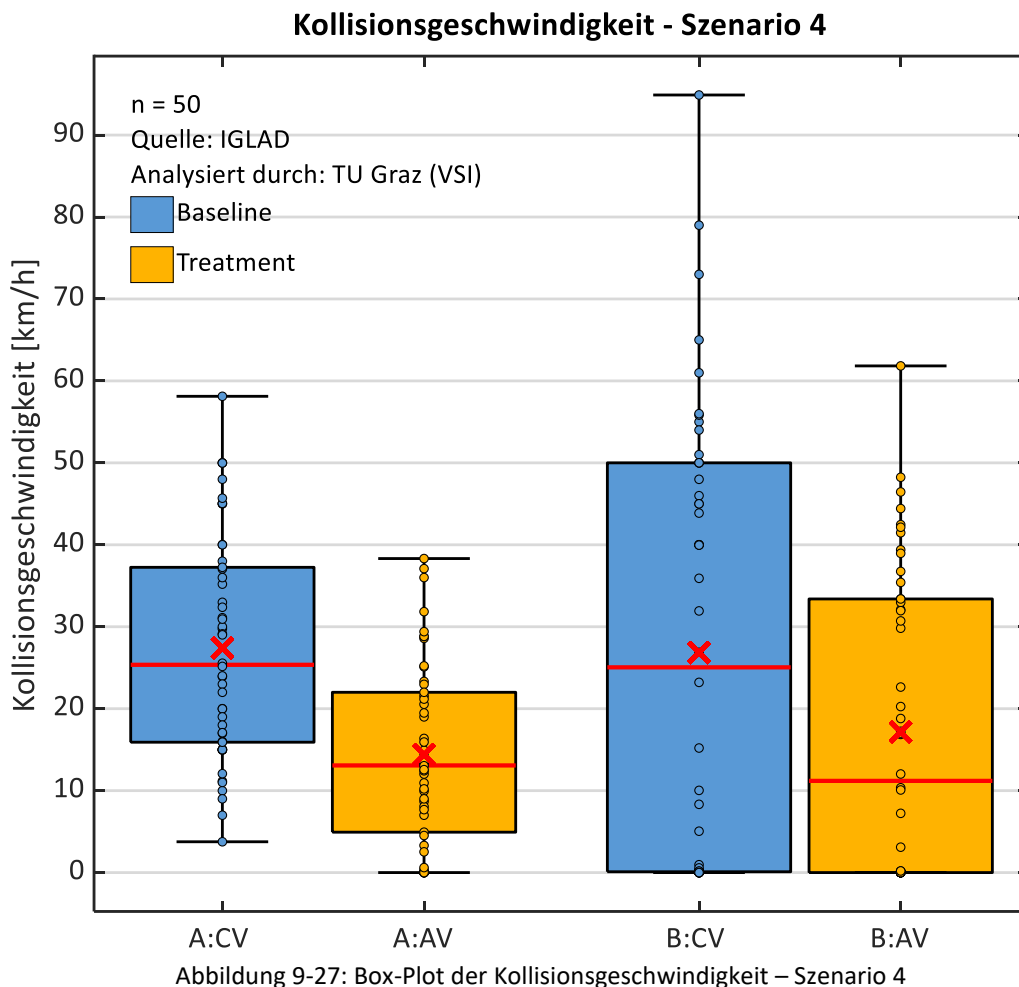


Tabelle 9-9: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 4

Kollisionsgeschwindigkeit - Szenario 4				
	A:BL	A:AV	B:BL	B:AV
Number n []	50	50	50	50
Median [km/h]	25,4	13,1	25,0	11,2
Mean Value [km/h]	27,4	14,4	26,8	17,2
Standard deviation [km/h]	13,6	11,0	26,9	18,2
Variance [(km/h) ²]	183,7	120,2	726,3	332,2
Minimum [km/h]	3,8	0,0	0,0	0,0
Maximum [km/h]	58,1	38,3	94,9	61,8

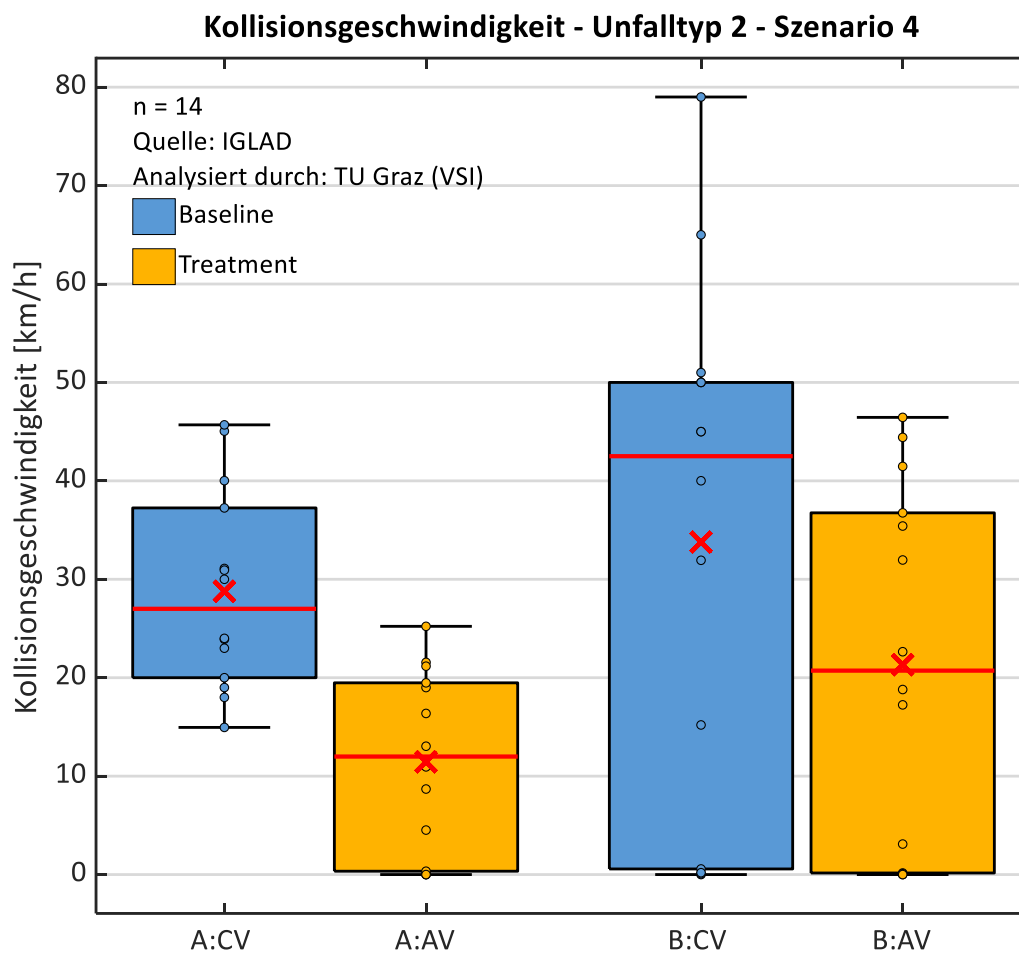


Abbildung 9-28: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 2 – Szenario 4

Tabelle 9-10: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 2 – Szenario 4

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 2 - Szenario 4				
	A:BL	A:AV	B:BL	B:AV
Number n []	14	14	14	14
Median [km/h]	27,0	12,0	42,5	20,7
Mean Value [km/h]	28,8	11,5	33,8	21,3
Standard deviation [km/h]	10,1	9,2	26,3	18,2
Variance [(km/h)^2]	101,6	85,2	691,5	329,7
Minimum [km/h]	15,0	0,0	0,0	0,0
Maximum [km/h]	45,7	25,2	79,0	46,5

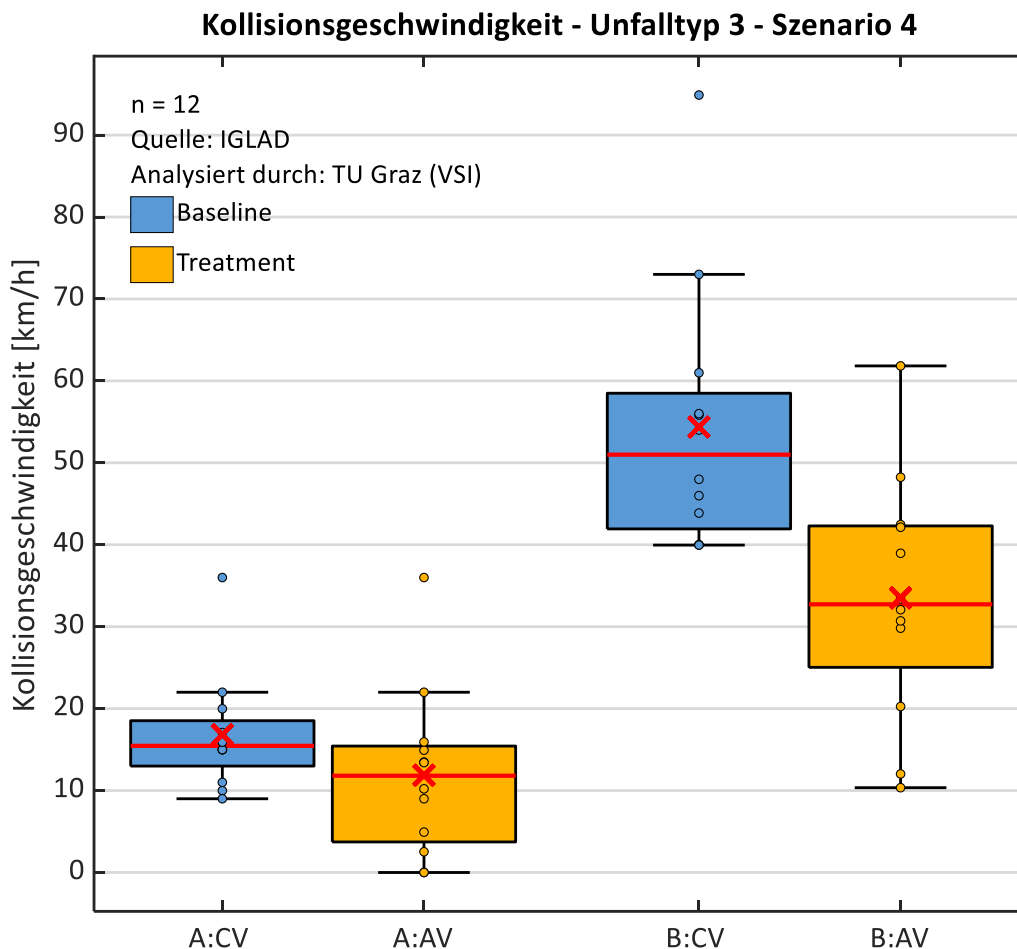


Abbildung 9-29: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 4

Tabelle 9-11: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 4

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 3 - Szenario 4				
	A:BL	A:AV	B:BL	B:AV
Number n []	12	12	12	12
Median [km/h]	15,5	11,8	51,0	32,7
Mean Value [km/h]	16,8	11,9	54,4	33,5
Standard deviation [km/h]	7,1	10,2	16,2	14,8
Variance [(km/h)^2]	50,7	104,0	261,8	218,2
Minimum [km/h]	9,0	0,0	40,0	10,4
Maximum [km/h]	36,0	36,0	94,9	61,8

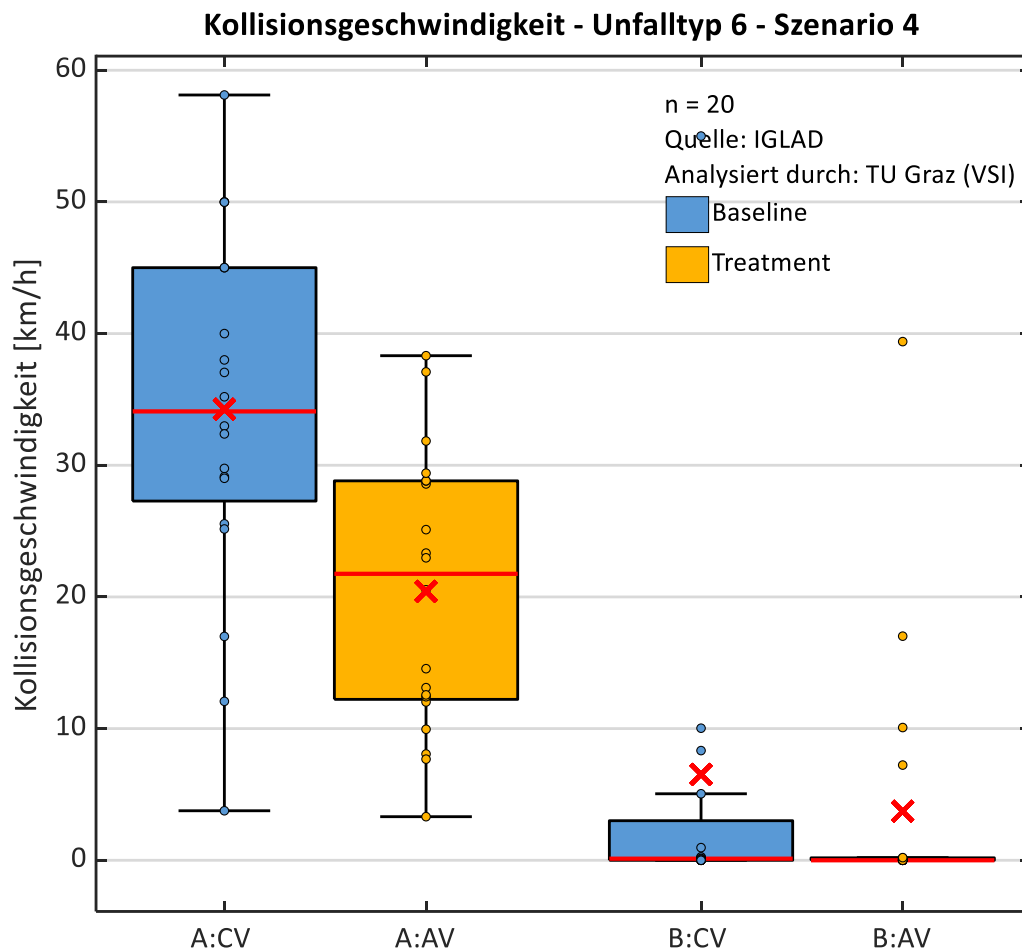


Abbildung 9-30: Box-Plot der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 6 – Szenario 4

Tabelle 9-12: Statistische Kennwerte der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 6 – Szenario 4

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 6 - Szenario 4				
	A:BL	A:AV	B:BL	B:AV
Number n []	20	20	20	20
Median [km/h]	34,1	21,8	0,1	0,0
Mean Value [km/h]	34,3	20,4	6,5	3,7
Standard deviation [km/h]	13,7	10,4	16,0	9,5
Variance [(km/h) ²]	187,2	108,2	256,4	90,4
Minimum [km/h]	3,8	3,3	0,0	0,0
Maximum [km/h]	58,1	38,3	55,0	39,4

B.2.2 Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit

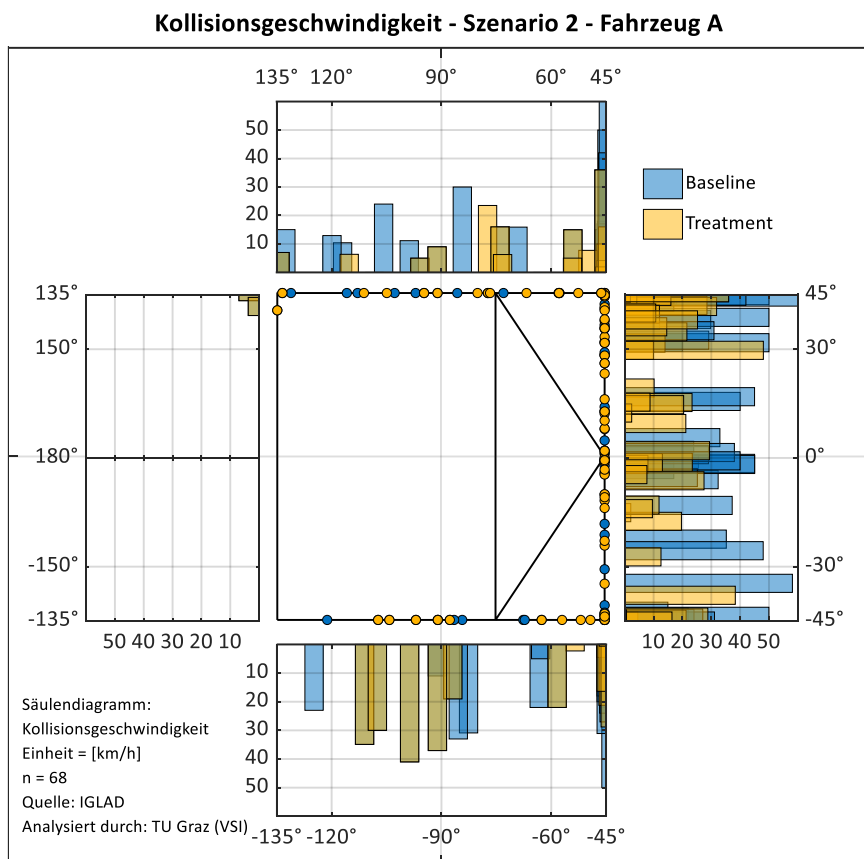


Abbildung 9-31: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 2 – Fahrzeug A

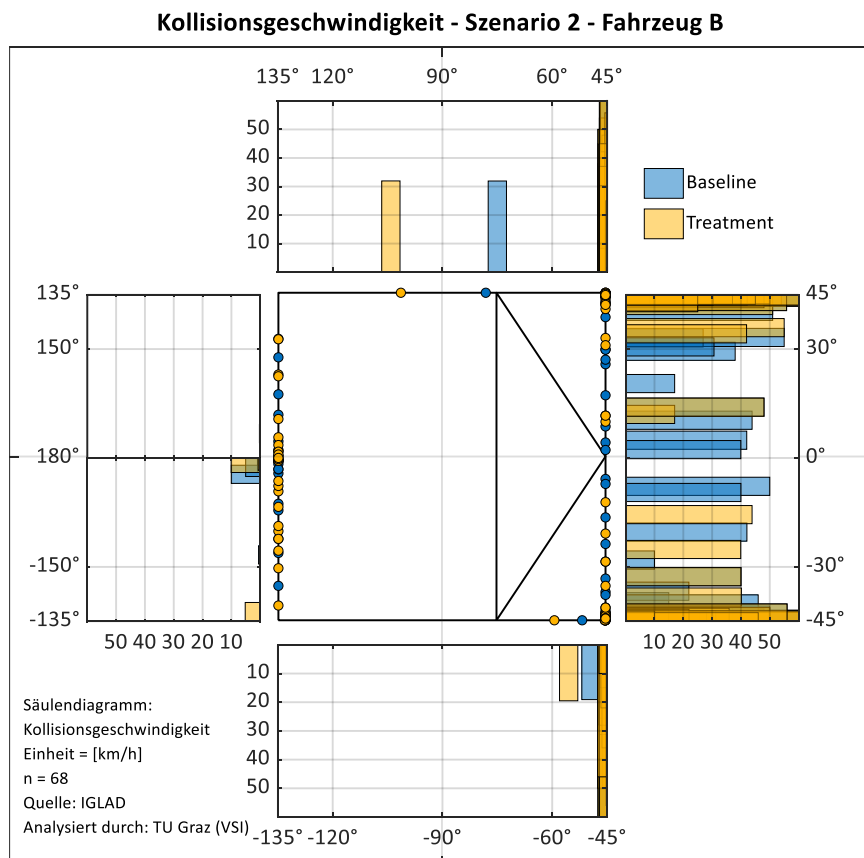


Abbildung 9-32: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 2 – Fahrzeug B

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 2 - Szenario 2 - Fahrzeug A

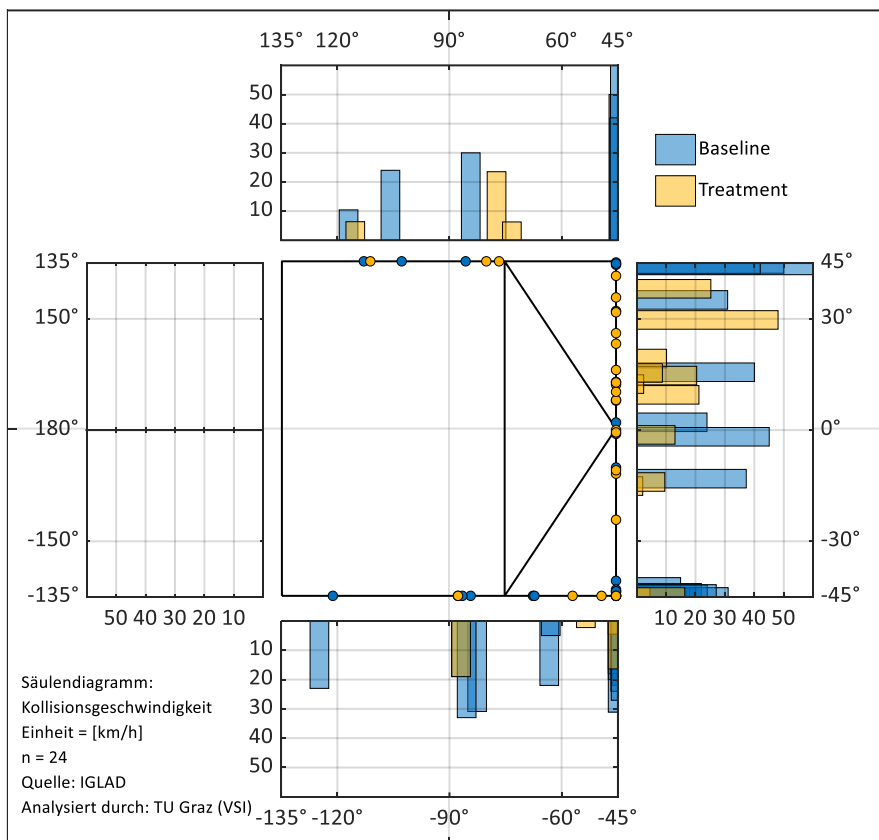


Abbildung 9-33: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 2 – Szenario 2 – Fahrzeug A

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 2 - Szenario 2 - Fahrzeug B

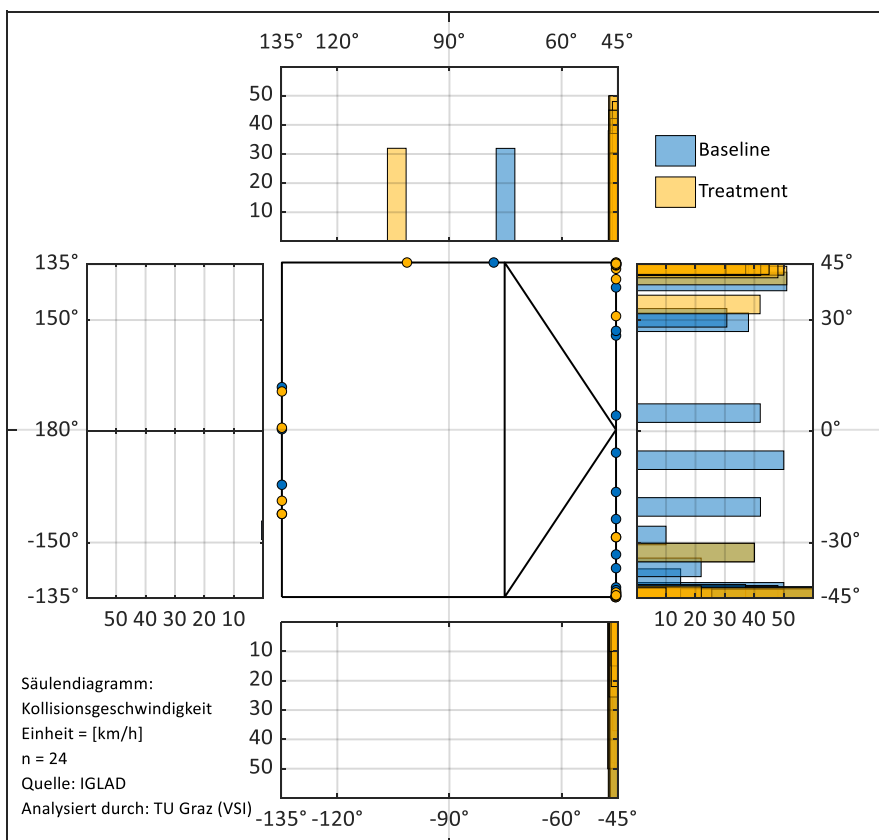


Abbildung 9-34: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 2 – Szenario 2 – Fahrzeug B

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 3 - Szenario 2 - Fahrzeug A

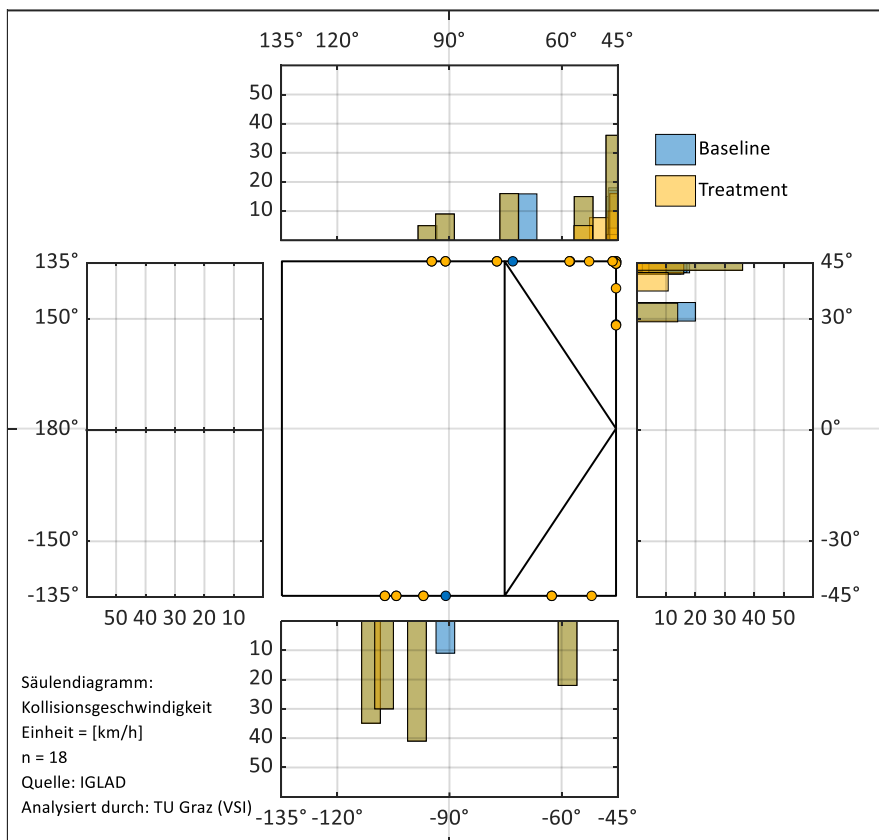


Abbildung 9-35: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 2 – Fahrzeug A

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 3 - Szenario 2 - Fahrzeug B

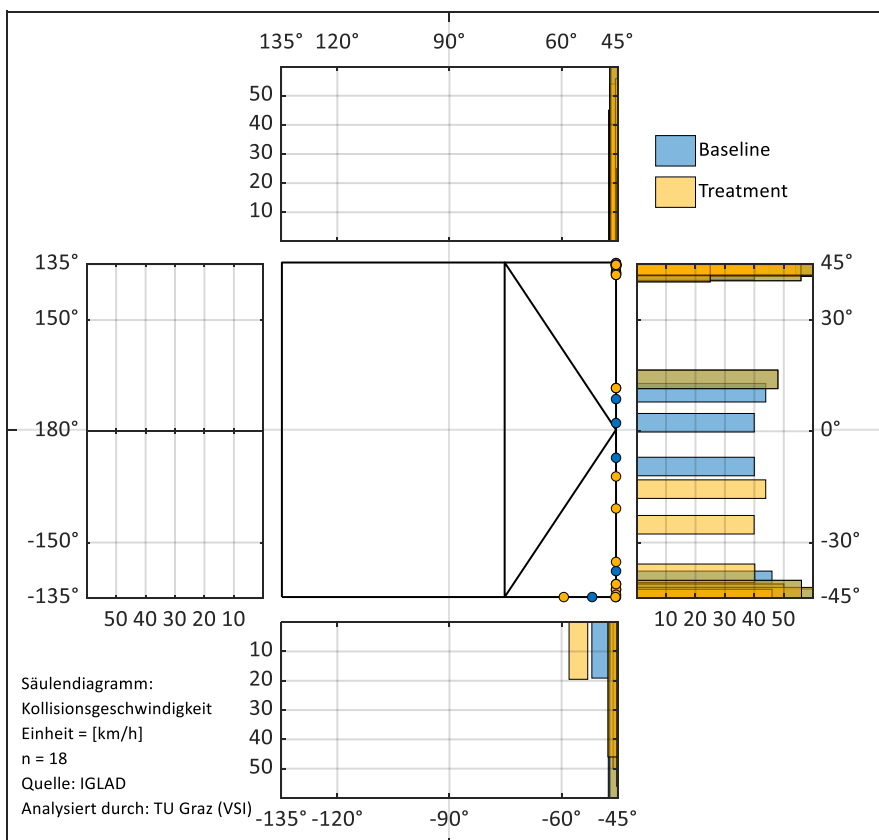


Abbildung 9-36: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 2 – Fahrzeug B

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 6 - Szenario 2 - Fahrzeug A

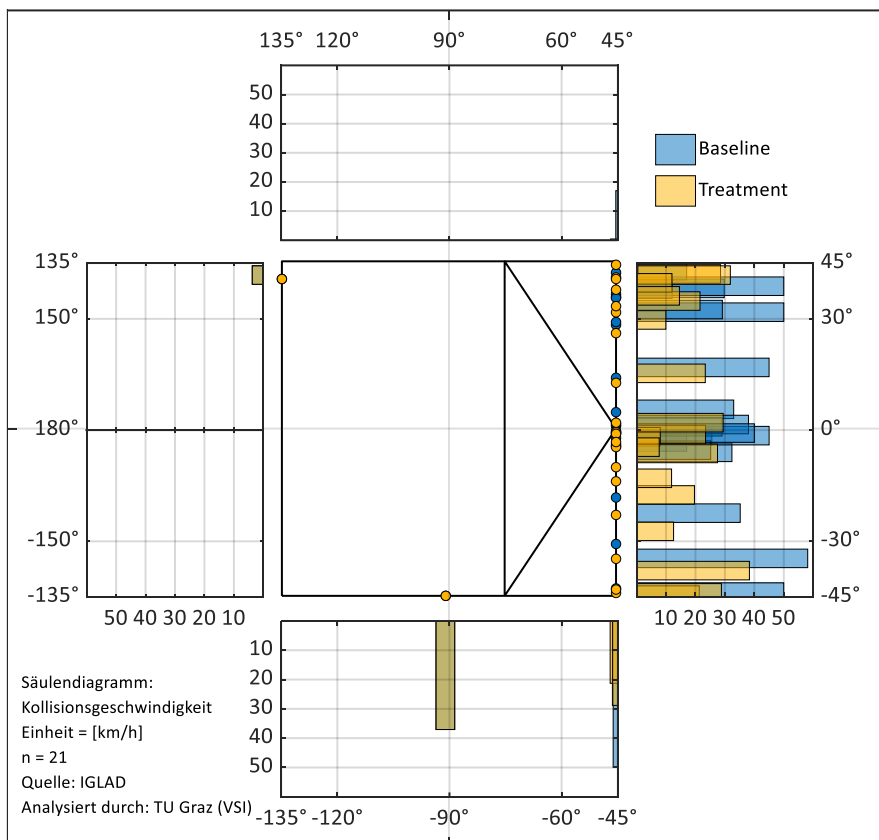


Abbildung 9-37: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 6 – Szenario 2 – Fahrzeug A

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 6 - Szenario 2 - Fahrzeug B

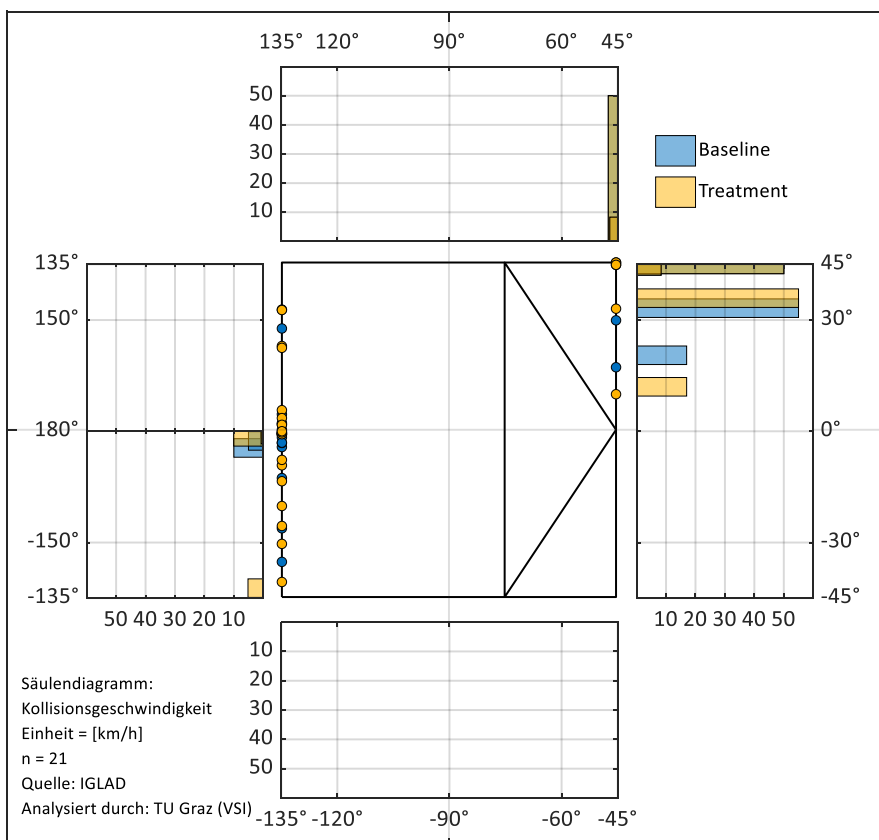


Abbildung 9-38: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 6 – Szenario 2 – Fahrzeug B

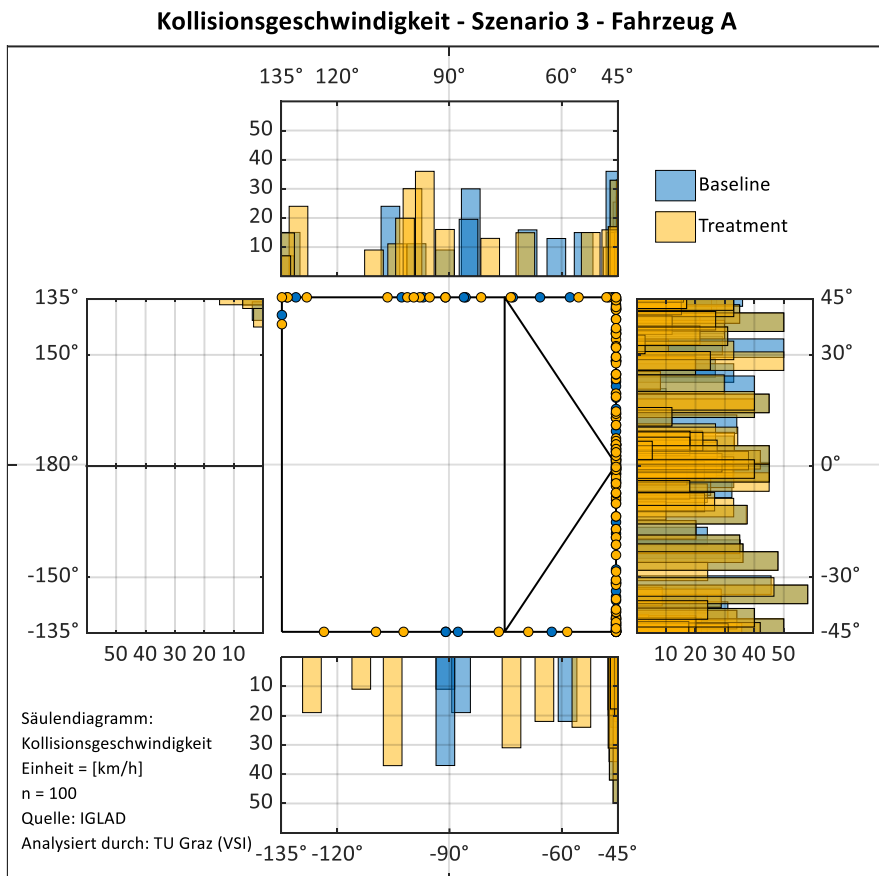


Abbildung 9-39: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 3 – Fahrzeug A

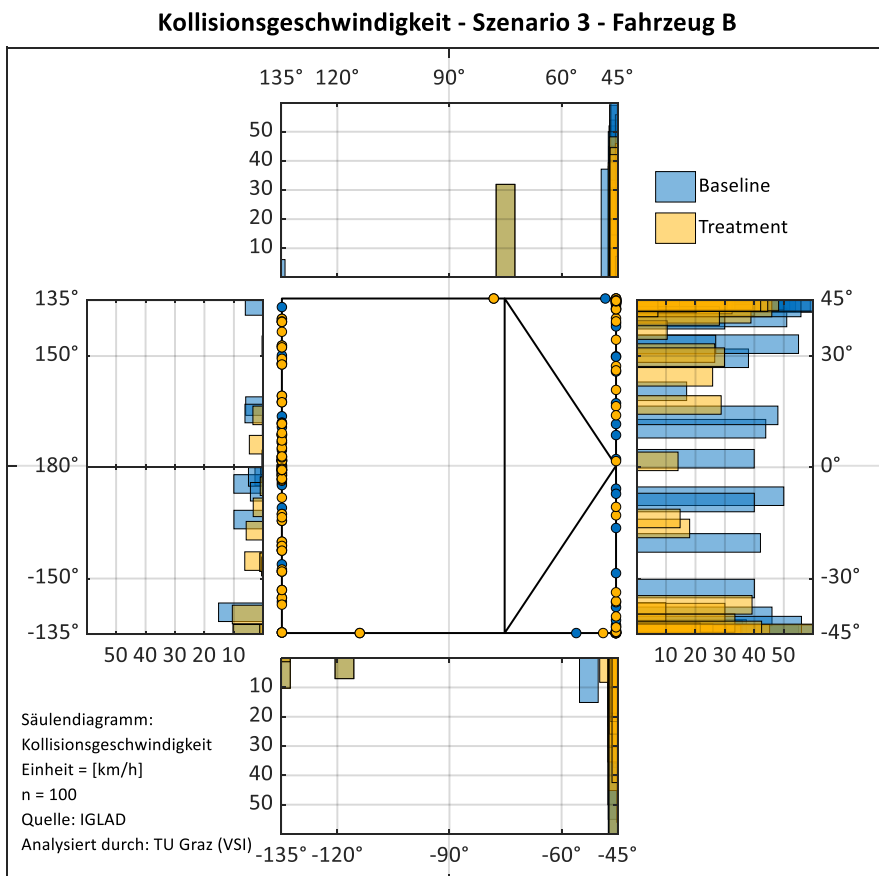


Abbildung 9-40: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 3 – Fahrzeug B

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 2 - Szenario 3 - Fahrzeug A

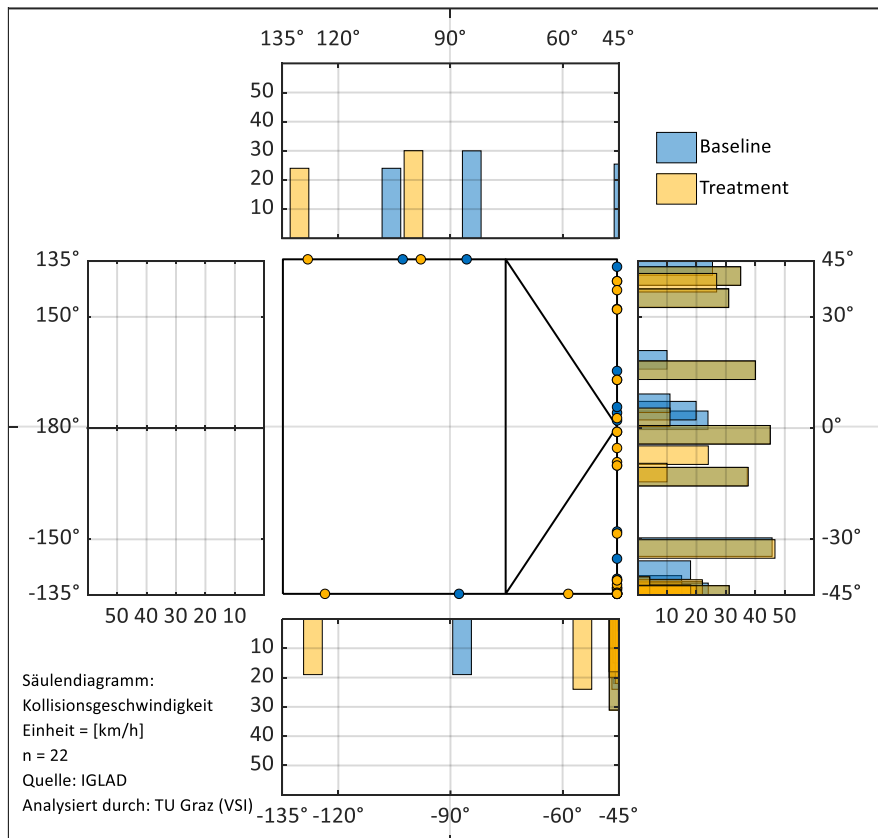


Abbildung 9-41: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 2 – Szenario 3 – Fahrzeug A

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 2 - Szenario 3 - Fahrzeug B

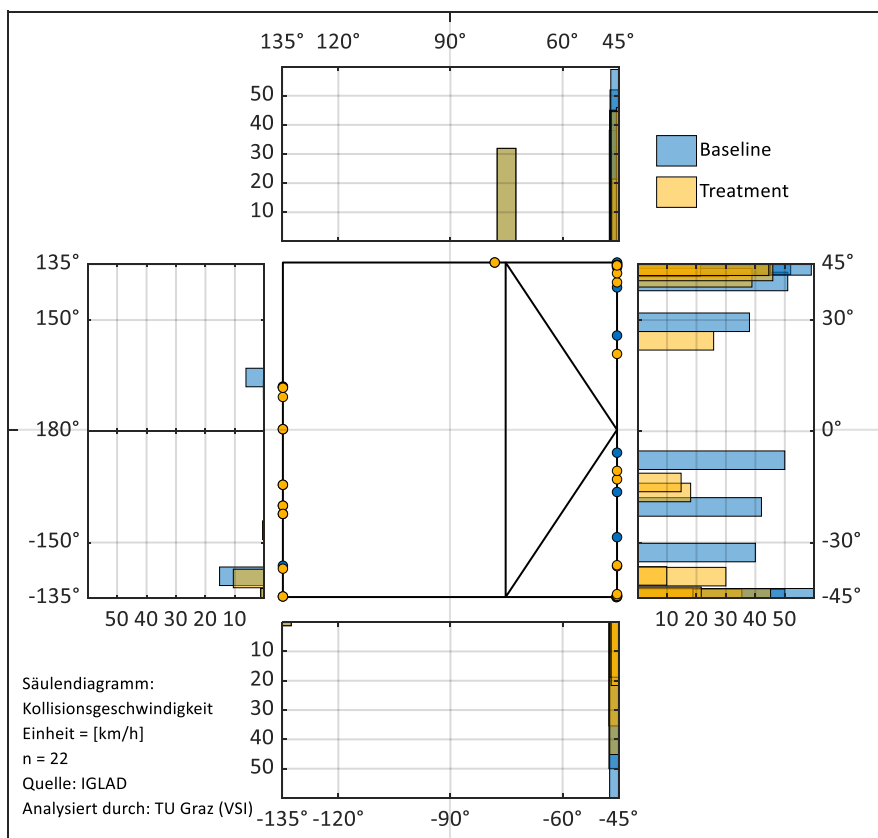


Abbildung 9-42: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 2 – Szenario 3 – Fahrzeug B

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 3 - Szenario 3 - Fahrzeug A

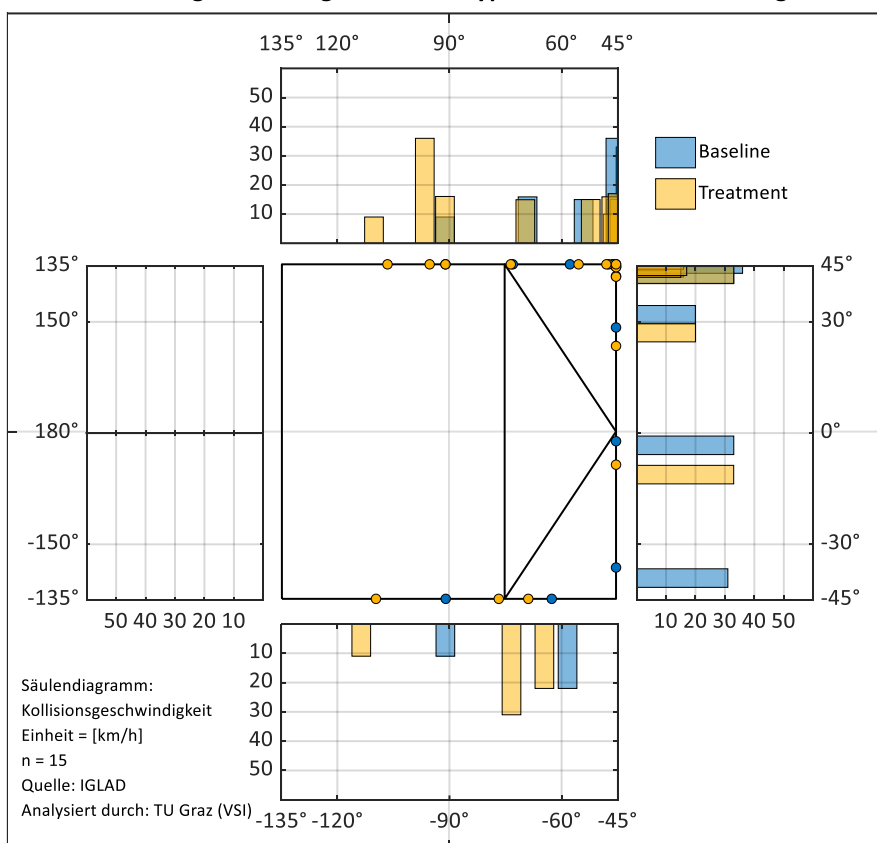


Abbildung 9-43: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 3 – Fahrzeug A

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 3 - Szenario 3 - Fahrzeug B

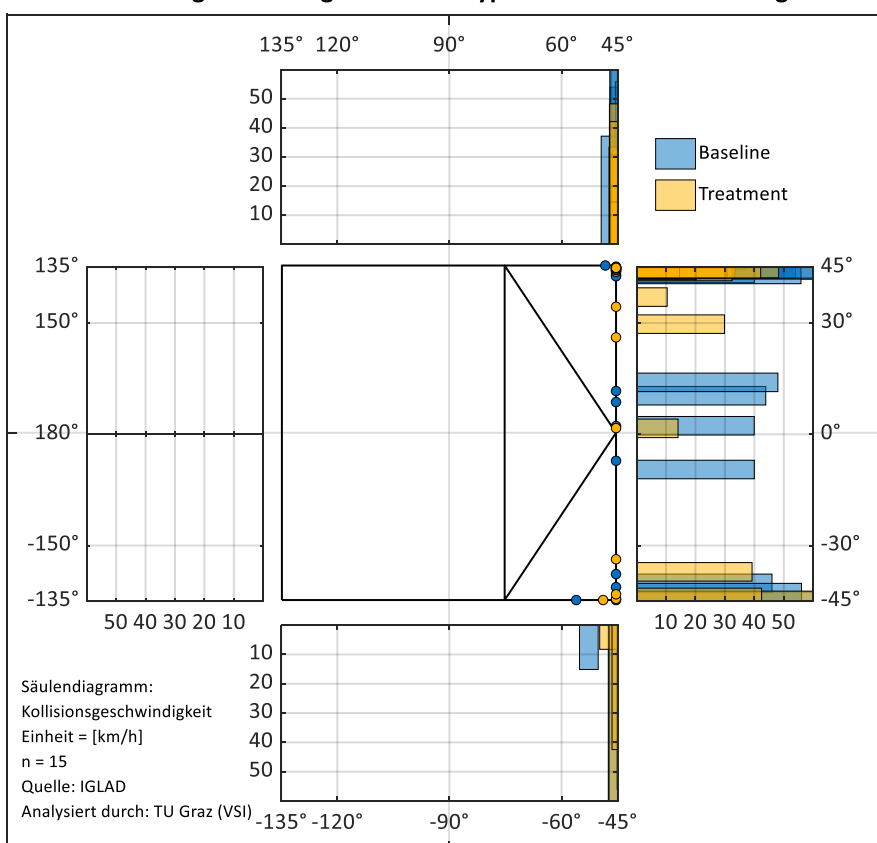


Abbildung 9-44: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 3 – Fahrzeug B

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 6 - Szenario 3 - Fahrzeug A

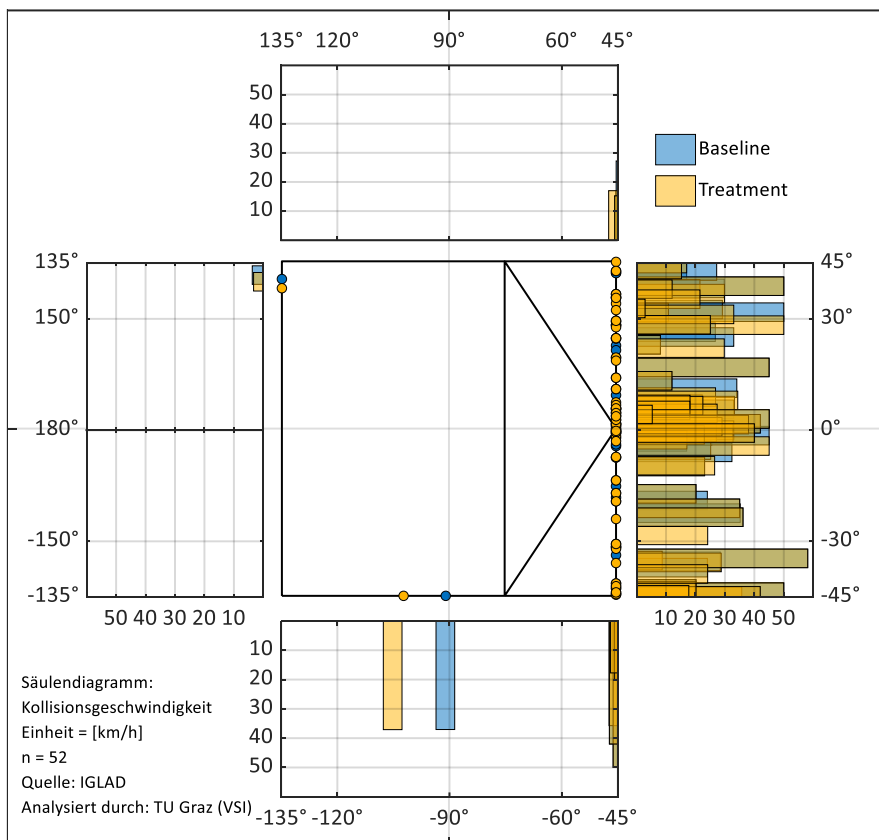


Abbildung 9-45: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 6 – Szenario 3 – Fahrzeug A

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 6 - Szenario 3 - Fahrzeug B

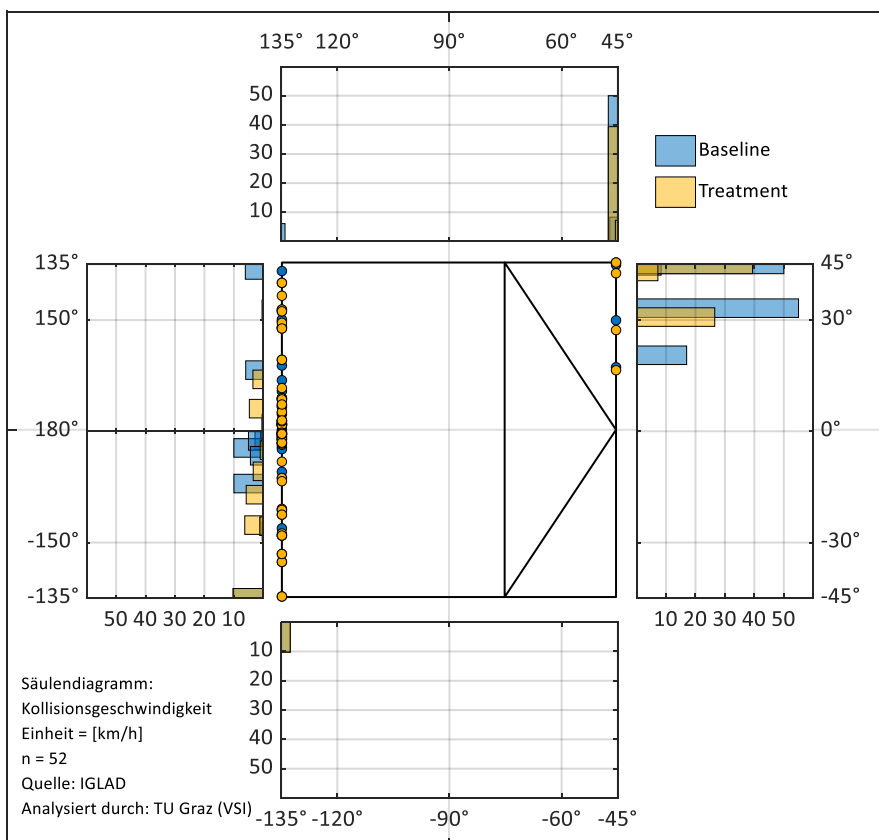


Abbildung 9-46: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 6 – Szenario 3 – Fahrzeug B

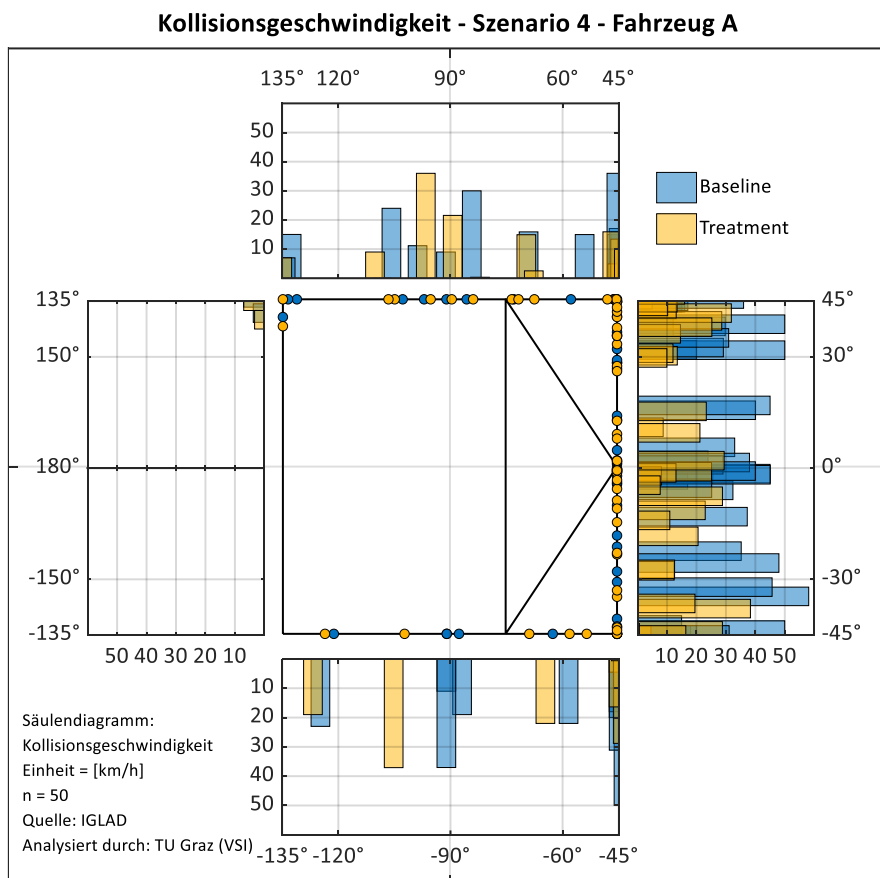


Abbildung 9-47: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 4 – Fahrzeug A

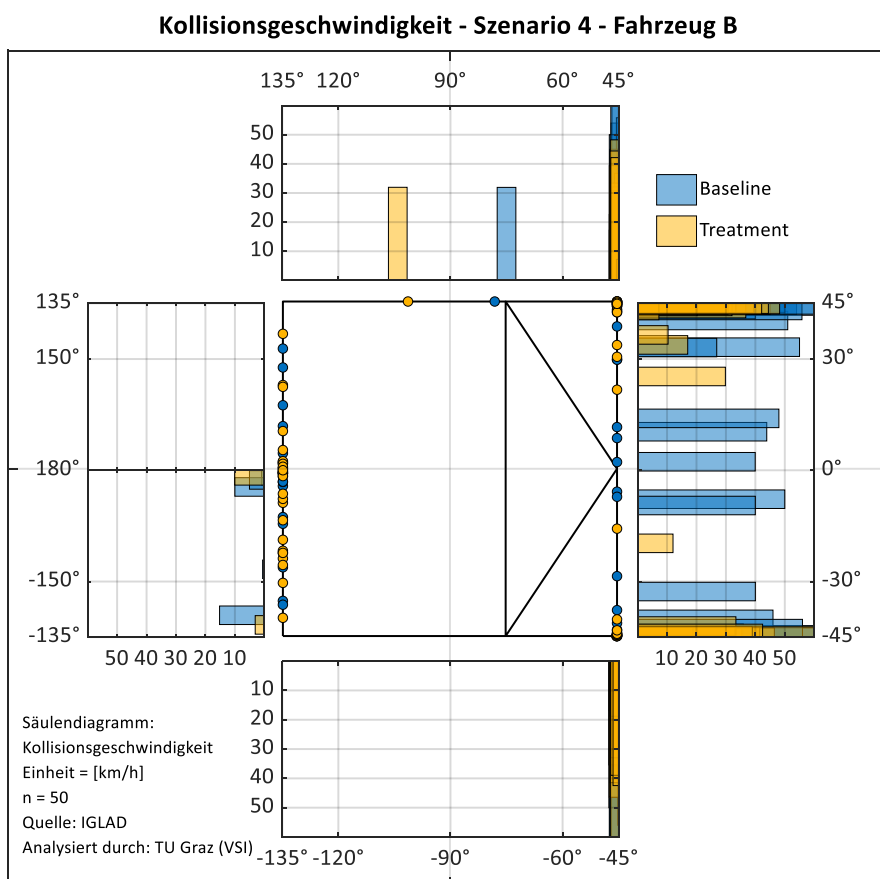


Abbildung 9-48: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Szenario 4 – Fahrzeug B

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 2 - Szenario 4 - Fahrzeug A

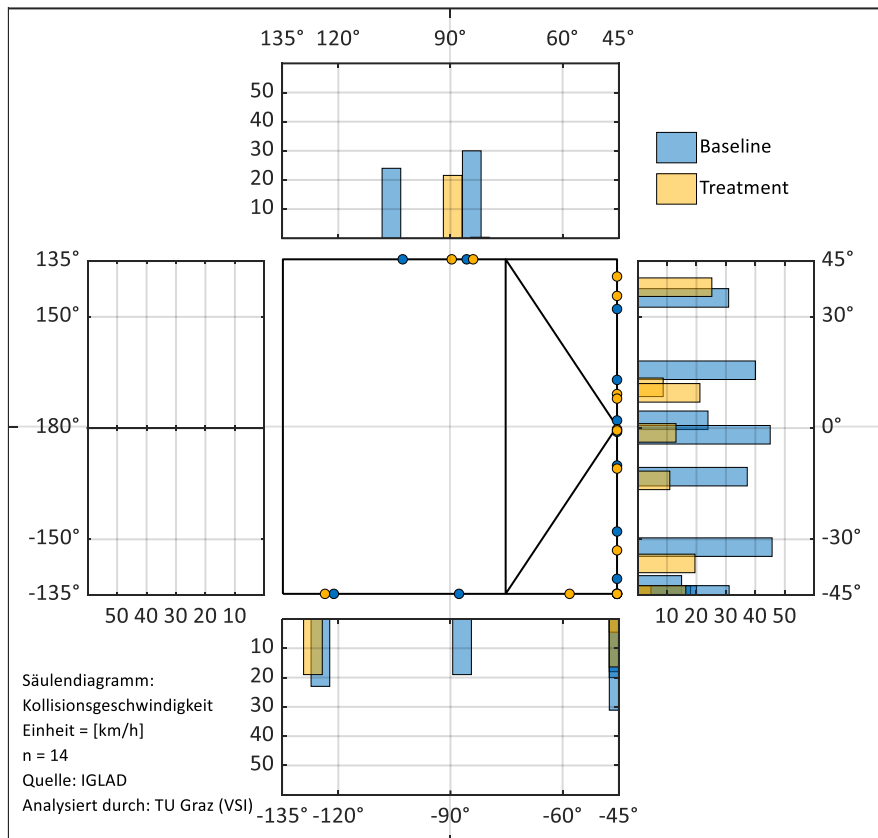


Abbildung 9-49: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 2 – Szenario 4 – Fahrzeug A

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 2 - Szenario 4 - Fahrzeug B

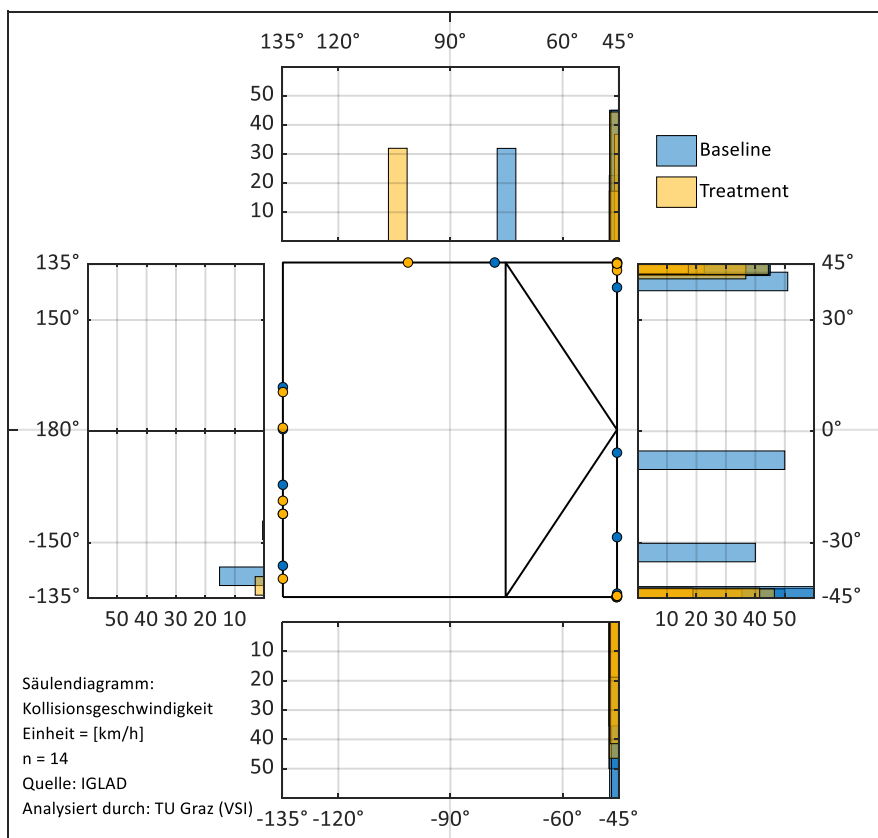


Abbildung 9-50: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 2 – Szenario 4 – Fahrzeug B

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 3 - Szenario 4 - Fahrzeug A

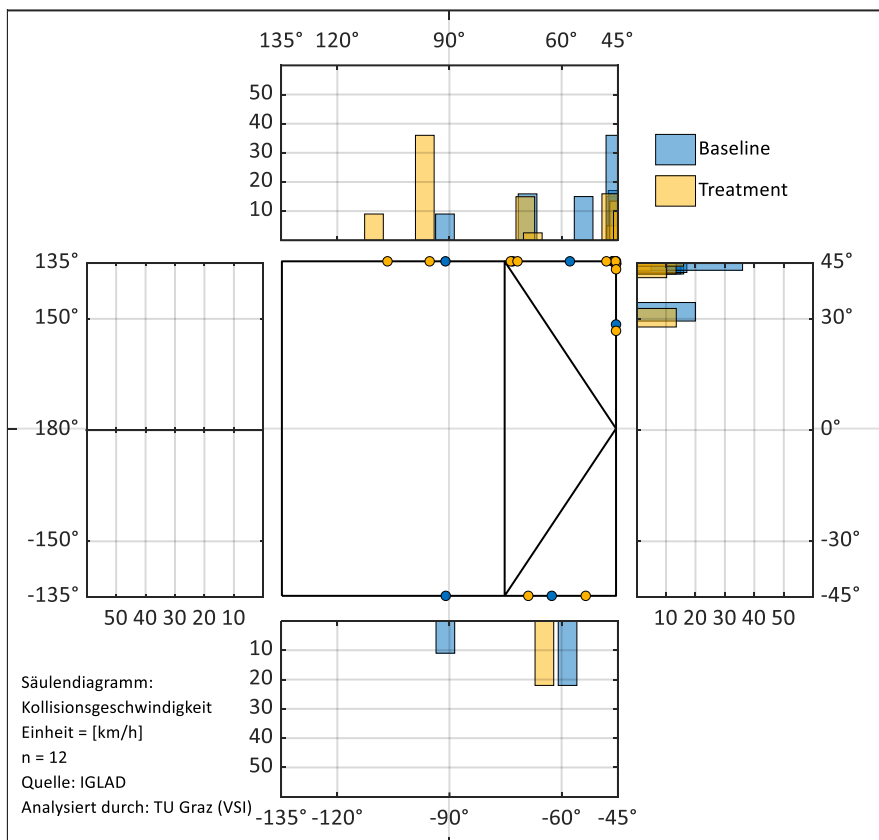


Abbildung 9-51: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 4 – Fahrzeug A

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 3 - Szenario 4 - Fahrzeug B

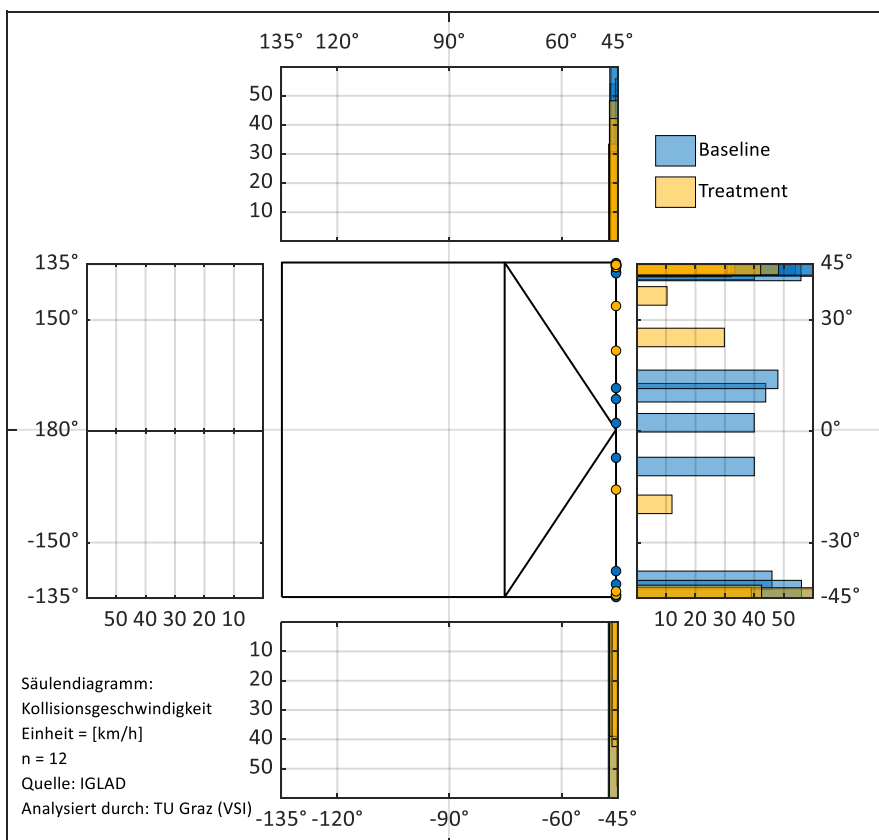


Abbildung 9-52: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 3 – Szenario 4 – Fahrzeug B

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 6 - Szenario 4 - Fahrzeug A

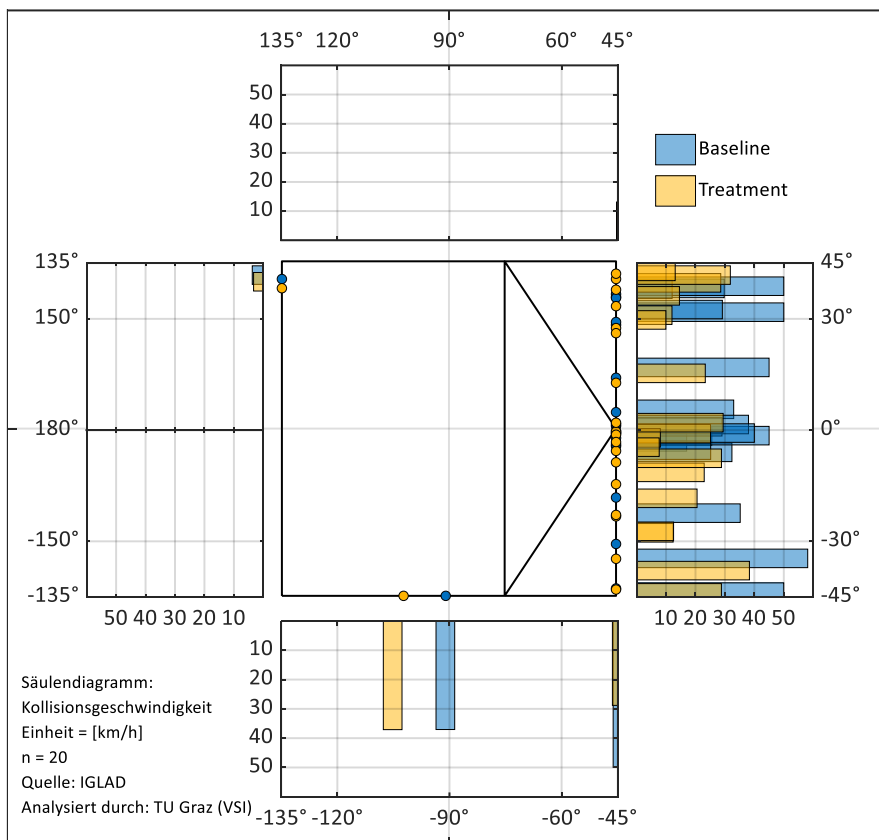


Abbildung 9-53: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 6 – Szenario 4 – Fahrzeug A

Kollisionsgeschwindigkeit - Unfalltyp 6 - Szenario 4 - Fahrzeug B

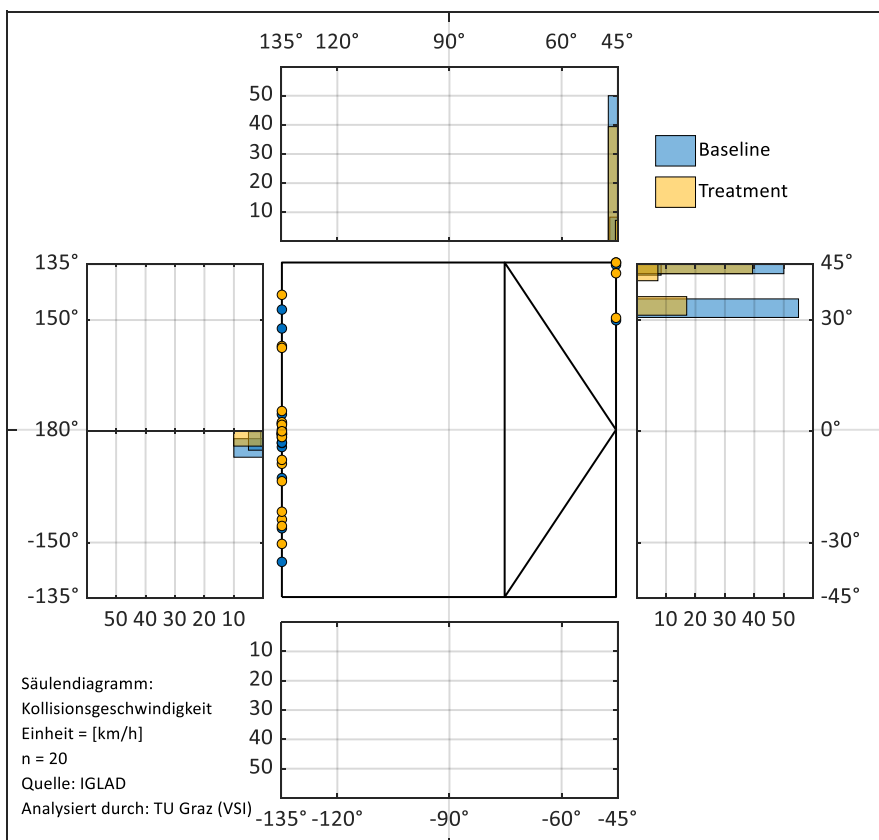


Abbildung 9-54: Verteilung der Kollisionsgeschwindigkeit – Unfalltyp 6 – Szenario 4 – Fahrzeug B

B.3 Delta-v

B.3.1 Box-Plot und statistische Kennwerte

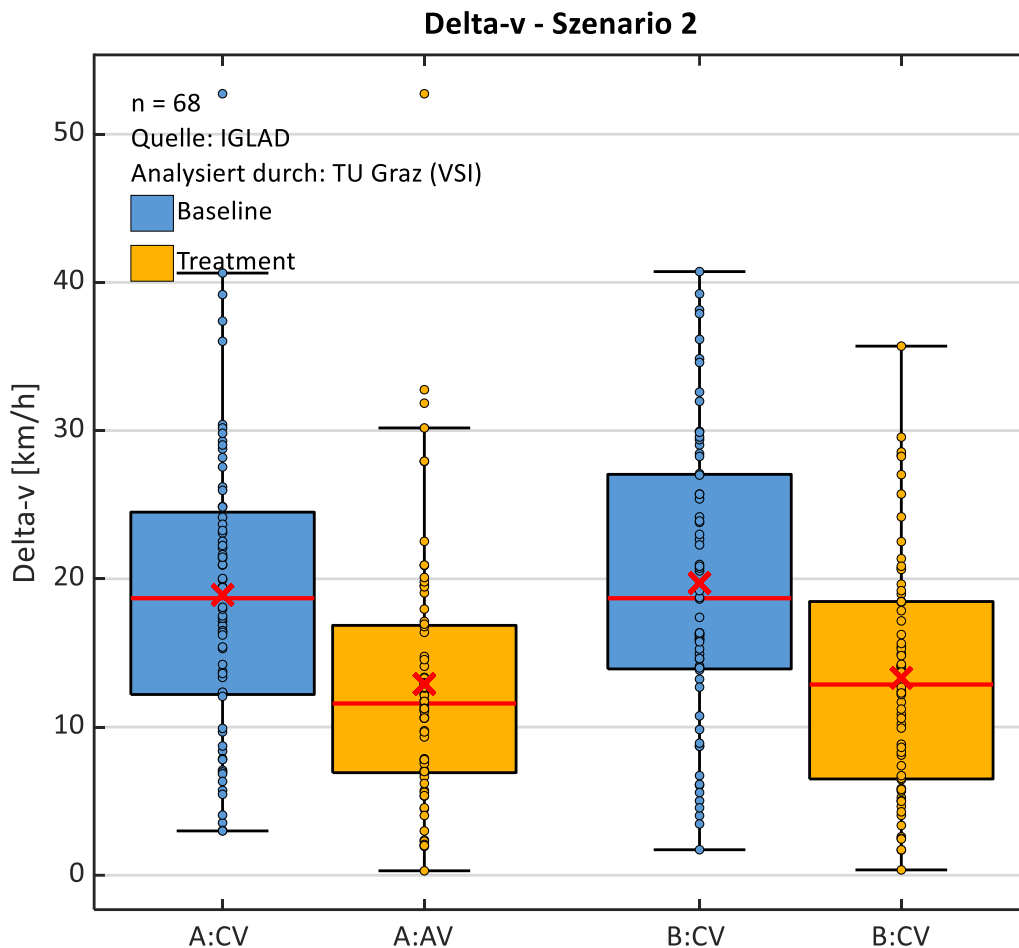


Abbildung 9-55: Box-Plot von delta-v – Szenario 2

Tabelle 9-13: Statistische Kennwerte von delta-v – Szenario 2

delta-v - Szenario 2				
	A:BL	A:AV	B:BL	B:CV
Number n []	68	68	68	68
Median [km/h]	18,7	11,6	18,7	12,9
Mean Value [km/h]	18,9	12,9	19,7	13,3
Standard deviation [km/h]	10,0	8,9	9,8	8,0
Variance [(km/h)^2]	99,4	78,6	95,9	64,0
Minimum [km/h]	3,0	0,3	1,7	0,4
Maximum [km/h]	52,7	52,7	40,7	35,7

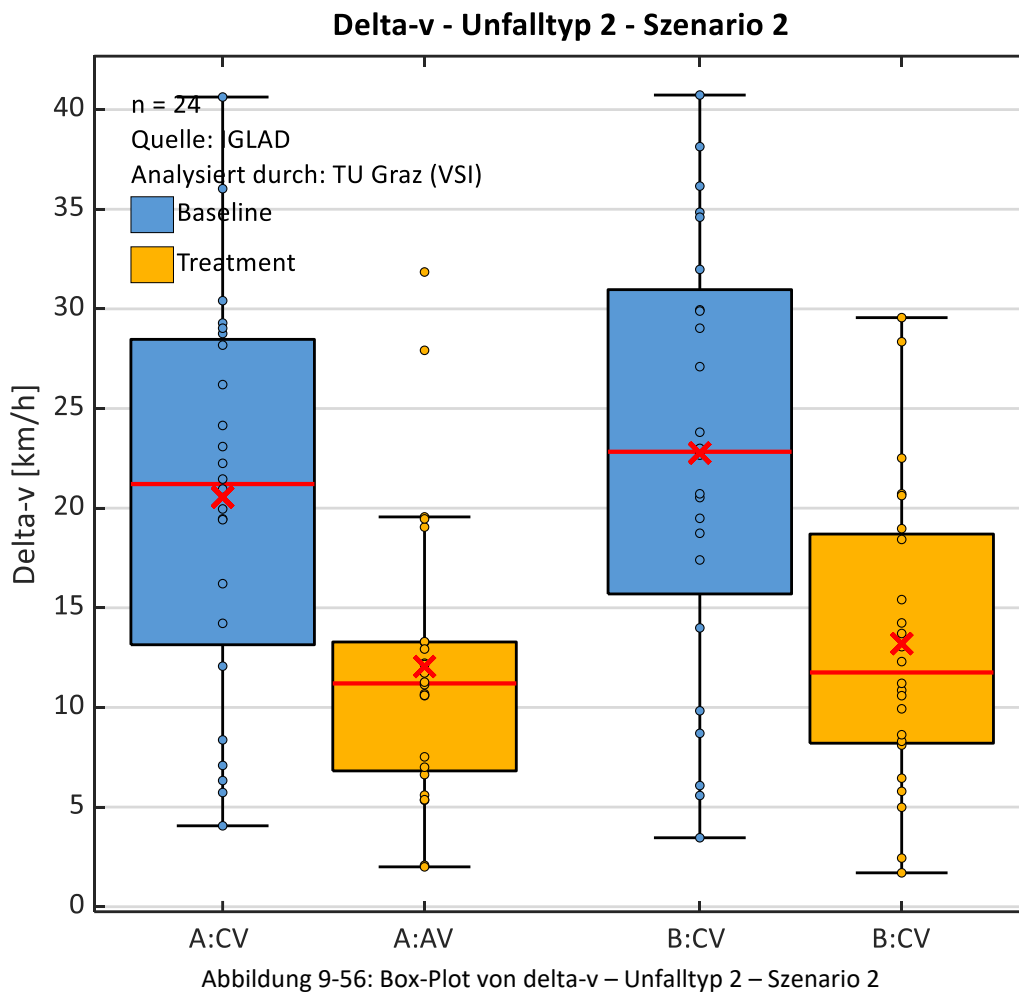


Tabelle 9-14: Statistische Kennwerte von delta-v – Unfalltyp 2 – Szenario 2

delta-v - Unfalltyp 2 - Szenario 2				
	A:BL	A:AV	B:BL	B:CV
Number n []	24	24	24	24
Median [km/h]	21,2	11,2	22,8	11,8
Mean Value [km/h]	20,6	12,1	22,8	13,2
Standard deviation [km/h]	9,8	7,3	10,9	7,5
Variance [(km/h)^2]	96,8	53,2	118,5	55,5
Minimum [km/h]	4,1	2,0	3,5	1,7
Maximum [km/h]	40,6	31,9	40,7	29,6

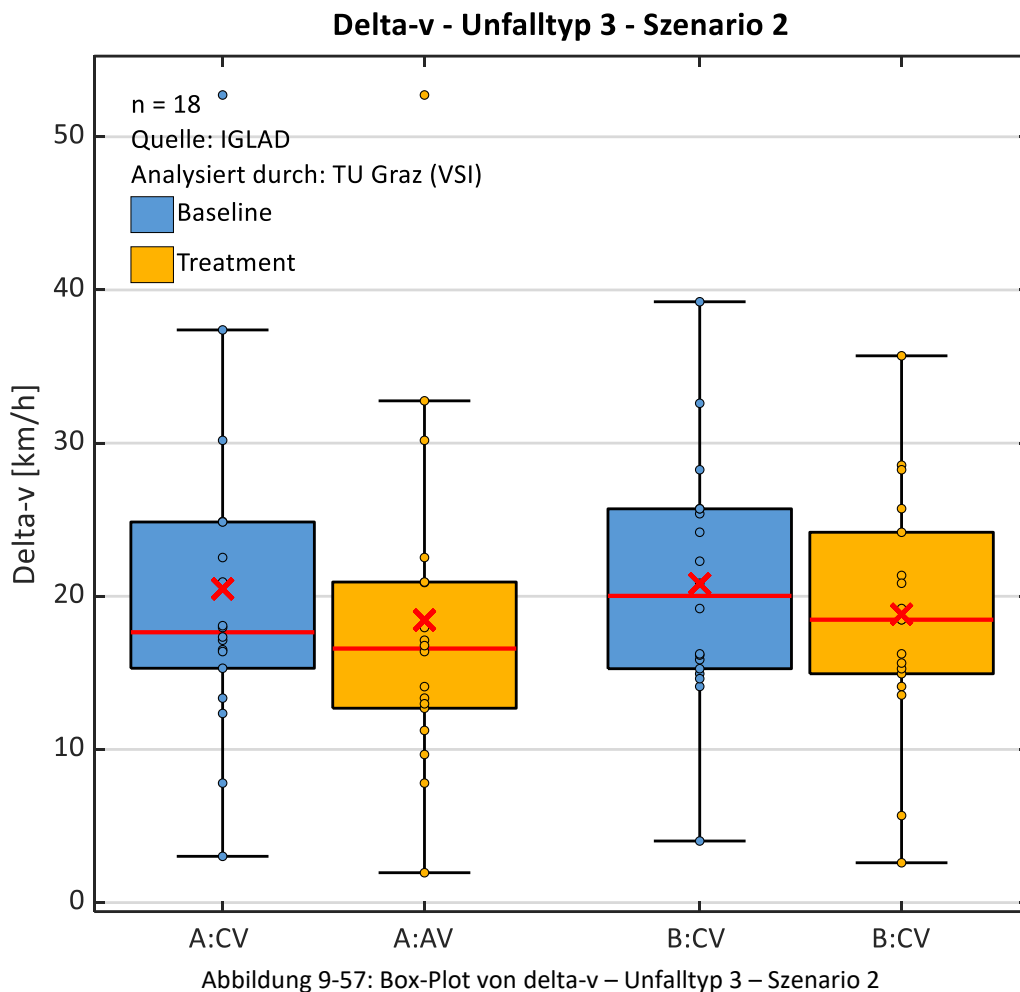


Tabelle 9-15: Statistische Kennwerte von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 2

delta-v - Unfalltyp 3 - Szenario 2				
	A:BL	A:AV	B:BL	B:CV
Number n []	18	18	18	18
Median [km/h]	17,7	16,6	20,0	18,5
Mean Value [km/h]	20,5	18,4	20,8	18,8
Standard deviation [km/h]	11,2	11,3	8,1	8,0
Variance [(km/h)^2]	125,8	128,1	65,7	63,9
Minimum [km/h]	3,0	2,0	4,0	2,6
Maximum [km/h]	52,7	52,7	39,2	35,7

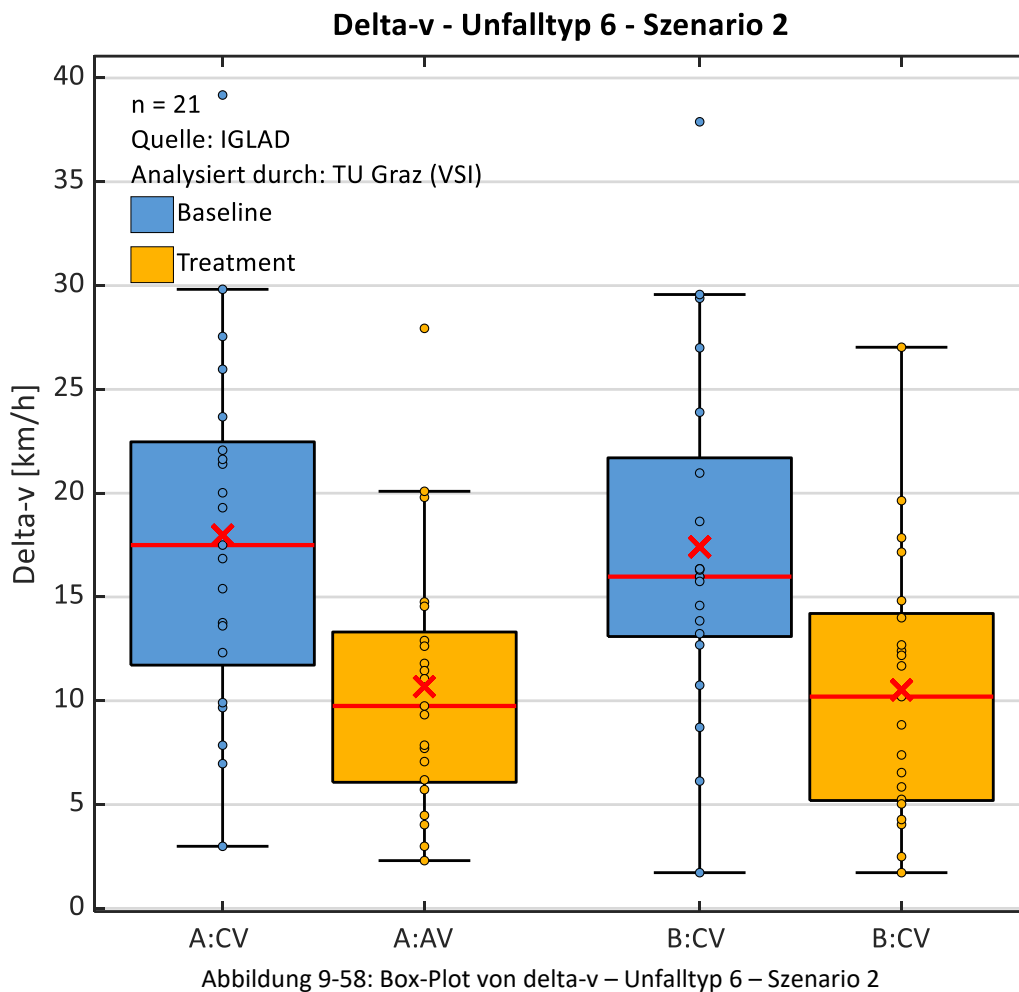


Tabelle 9-16: Statistische Kennwerte von delta-v – Unfalltyp 6 – Szenario 2

delta-v - Unfalltyp 6 - Szenario 2				
	A:BL	A:AV	B:BL	B:CV
Number n []	21	21	21	21
Median [km/h]	17,5	9,8	16,0	10,2
Mean Value [km/h]	18,0	10,7	17,4	10,5
Standard deviation [km/h]	8,6	6,3	8,4	6,4
Variance [(km/h)^2]	74,2	40,1	71,2	41,4
Minimum [km/h]	3,0	2,3	1,7	1,7
Maximum [km/h]	39,2	27,9	37,9	27,0

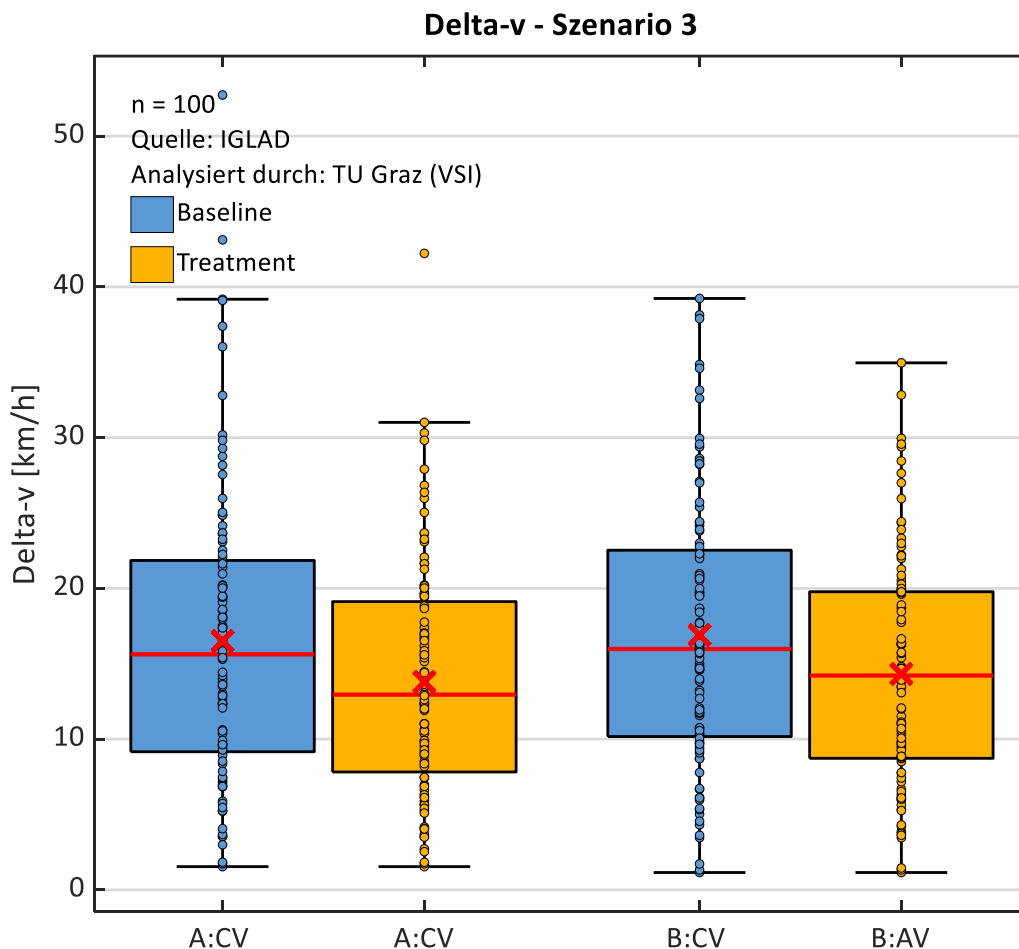


Abbildung 9-59: Box-Plot von delta-v – Szenario 3

Tabelle 9-17: Statistische Kennwerte von delta-v – Szenario 3

delta-v - Szenario 3				
	A:BL	A:CV	B:BL	B:AV
Number n []	100	100	100	100
Median [km/h]	15,6	13,0	16,0	14,2
Mean Value [km/h]	16,5	13,8	16,9	14,3
Standard deviation [km/h]	9,8	7,7	8,9	7,6
Variance [(km/h)^2]	96,3	59,8	79,1	58,4
Minimum [km/h]	1,5	1,5	1,2	1,2
Maximum [km/h]	52,7	42,2	39,2	35,0

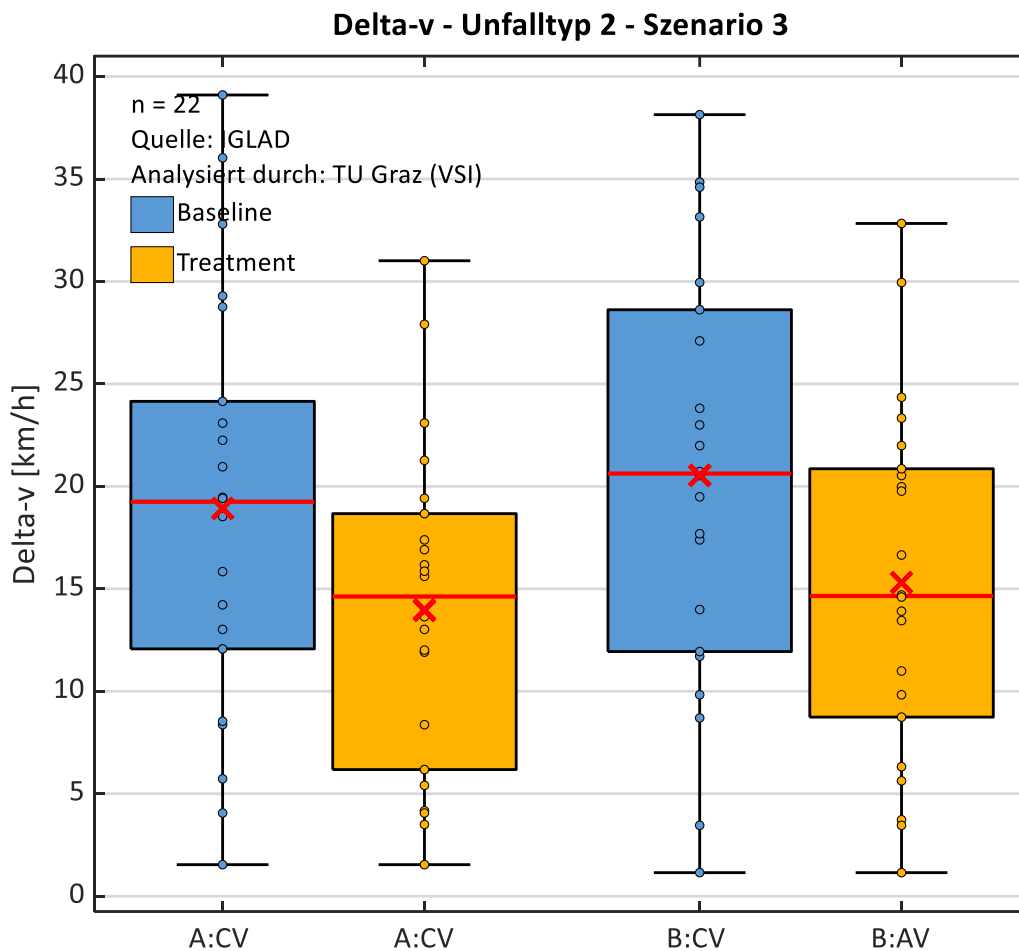


Abbildung 9-60: Box-Plot von delta-v – Unfalltyp 2 – Szenario 3

Tabelle 9-18: Statistische Kennwerte von delta-v – Unfalltyp 2 – Szenario 3

delta-v - Unfalltyp 2 - Szenario 3				
	A:BL	A:CV	B:BL	B:AV
Number n []	22	22	22	22
Median [km/h]	19,3	14,6	20,6	14,7
Mean Value [km/h]	18,9	14,0	20,5	15,3
Standard deviation [km/h]	10,2	8,0	10,3	8,6
Variance [(km/h)^2]	104,1	63,7	105,9	74,3
Minimum [km/h]	1,5	1,5	1,2	1,2
Maximum [km/h]	39,1	31,0	38,1	32,8

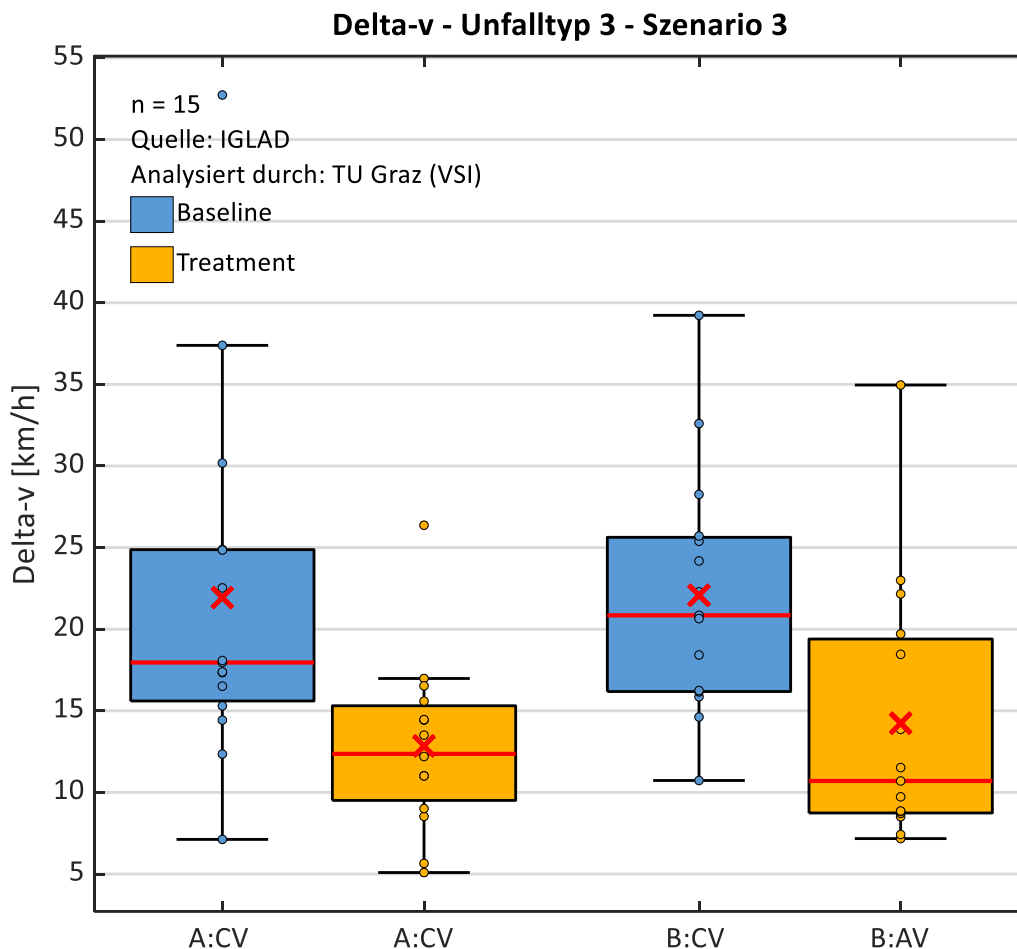


Abbildung 9-61: Box-Plot von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 3

Tabelle 9-19: Statistische Kennwerte von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 3

delta-v - Unfalltyp 3 - Szenario 3				
	A:BL	A:CV	B:BL	B:AV
Number n []	15	15	15	15
Median [km/h]	18,0	12,4	20,9	10,7
Mean Value [km/h]	21,9	12,8	22,1	14,2
Standard deviation [km/h]	11,3	5,2	7,5	7,9
Variance [(km/h)^2]	127,6	27,1	55,8	62,5
Minimum [km/h]	7,1	5,1	10,7	7,2
Maximum [km/h]	52,7	26,4	39,2	35,0

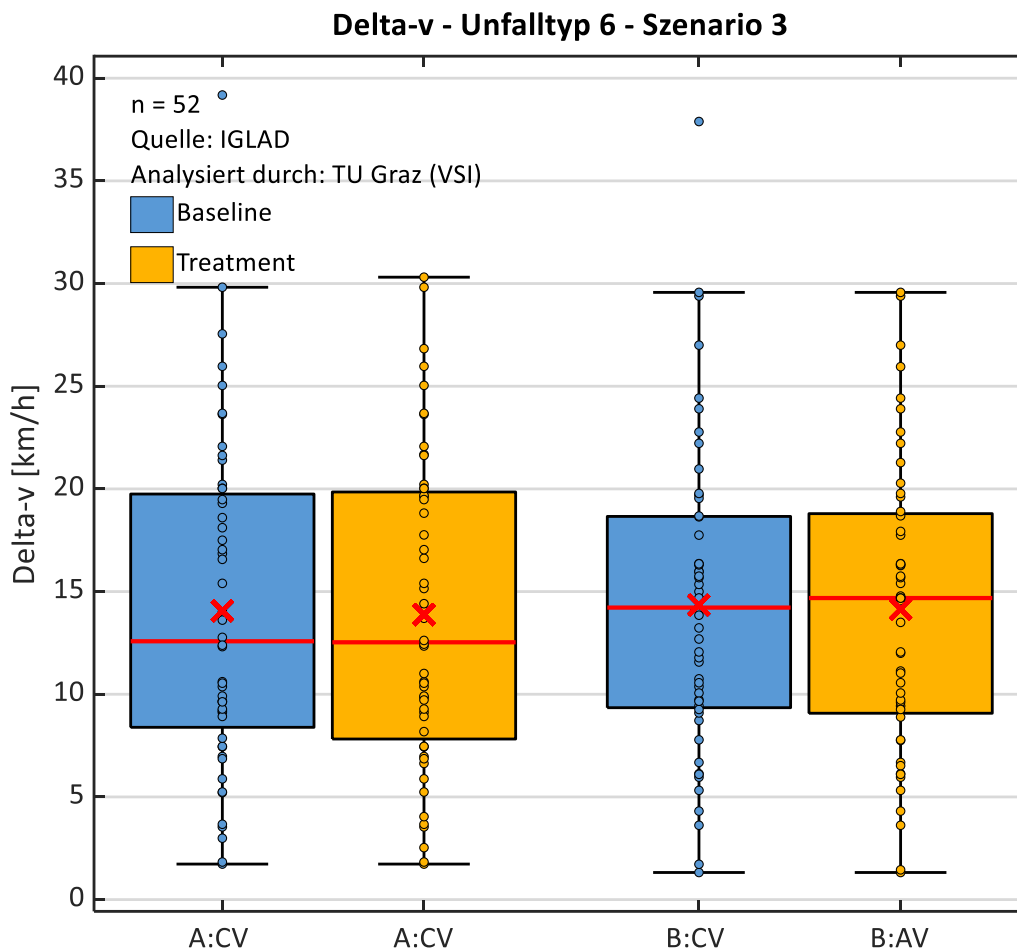


Abbildung 9-62: Box-Plot von delta-v – Unfalltyp 6 – Szenario 3

Tabelle 9-20: Statistische Kennwerte von delta-v – Unfalltyp 6 – Szenario 3

delta-v - Unfalltyp 6 - Szenario 3				
	A:BL	A:CV	B:BL	B:AV
Number n []	52	52	52	52
Median [km/h]	12,6	12,5	14,2	14,7
Mean Value [km/h]	14,1	13,9	14,3	14,1
Standard deviation [km/h]	8,0	7,6	7,5	7,1
Variance [(km/h)^2]	63,4	57,2	56,3	49,7
Minimum [km/h]	1,7	1,7	1,3	1,3
Maximum [km/h]	39,2	30,3	37,9	29,6

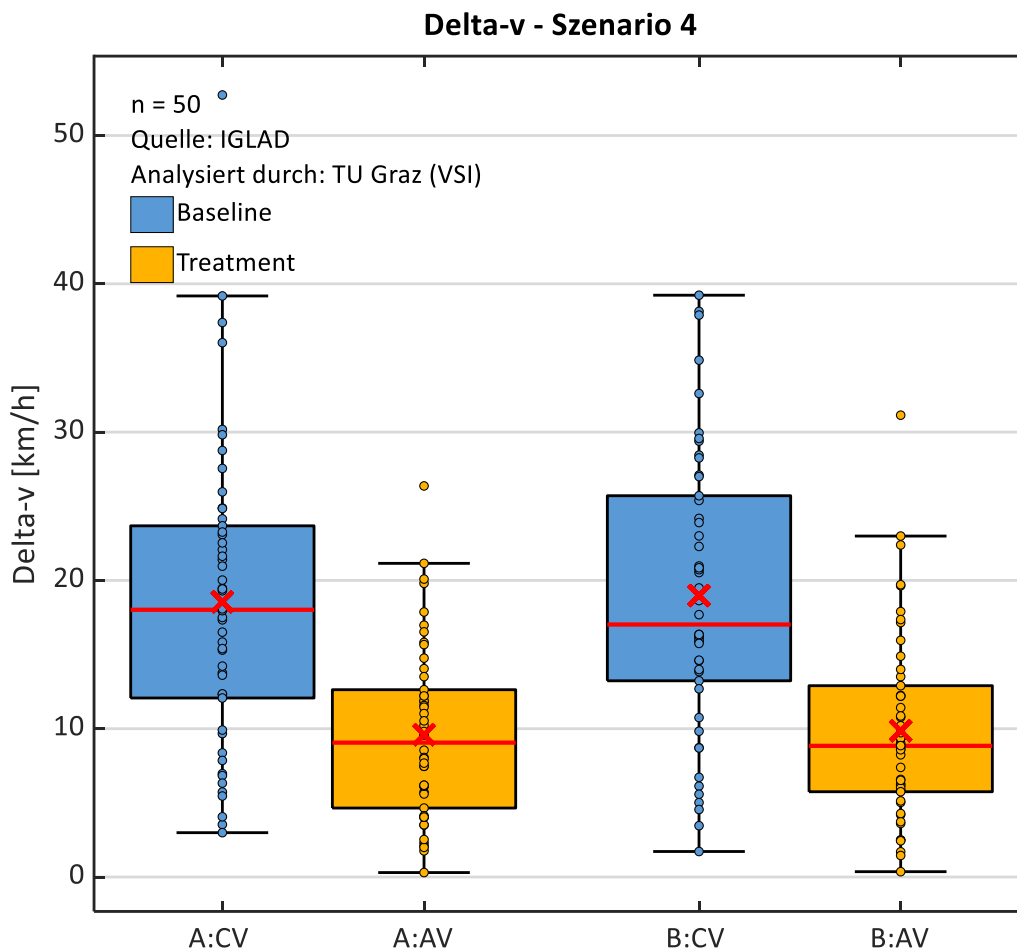


Abbildung 9-63: Box-Plot von delta-v – Szenario 4

Tabelle 9-21: Statistische Kennwerte von delta-v – Szenario 4

delta-v - Szenario 4				
	A:BL	A:AV	B:BL	B:AV
Number n []	50	50	50	50
Median [km/h]	18,0	9,1	17,0	8,8
Mean Value [km/h]	18,6	9,6	19,0	9,9
Standard deviation [km/h]	10,1	5,8	9,5	6,4
Variance [(km/h)^2]	102,4	34,0	90,3	40,3
Minimum [km/h]	3,0	0,3	1,7	0,4
Maximum [km/h]	52,7	26,4	39,2	31,1

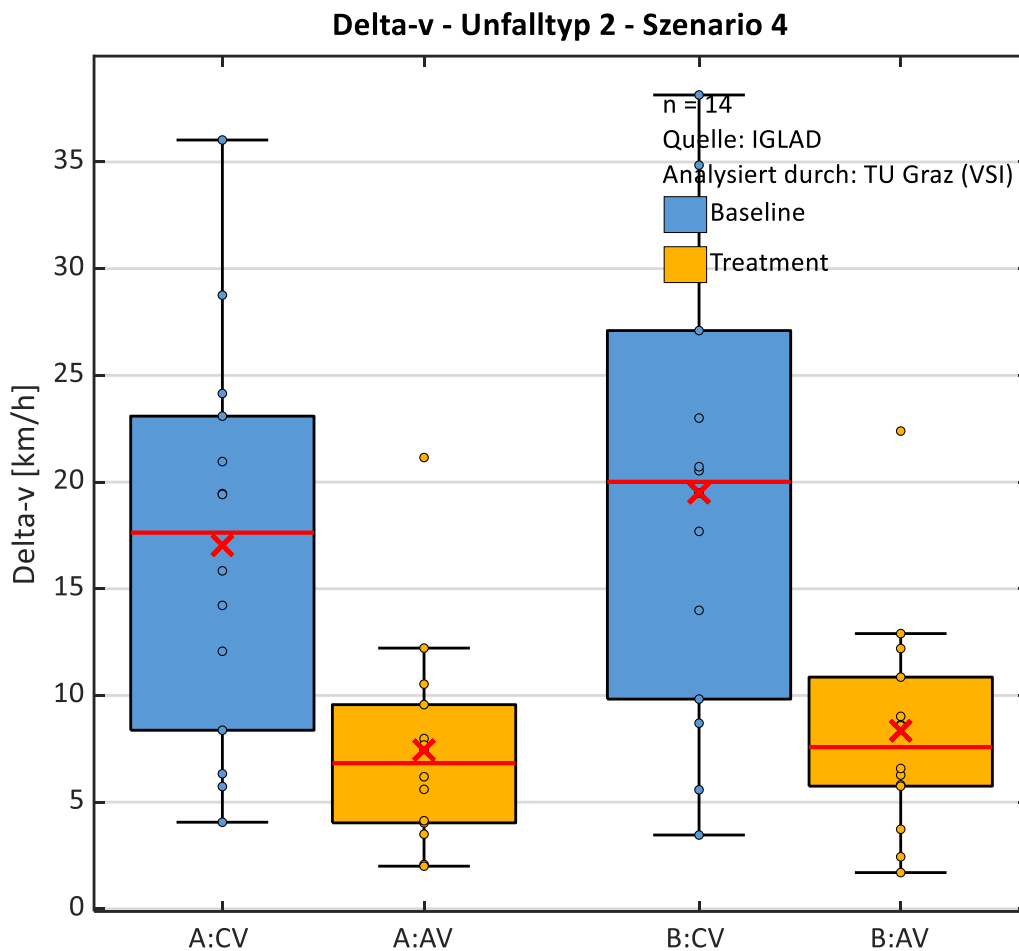


Tabelle 9-22: Statistische Kennwerte von delta-v – Unfalltyp 2 – Szenario 4

delta-v - Unfalltyp 2 - Szenario 4				
	A:BL	A:AV	B:BL	B:AV
Number n []	14	14	14	14
Median [km/h]	17,6	6,8	20,0	7,6
Mean Value [km/h]	17,0	7,4	19,5	8,3
Standard deviation [km/h]	9,3	5,0	10,6	5,3
Variance [(km/h)^2]	87,1	25,1	112,3	27,7
Minimum [km/h]	4,1	2,0	3,5	1,7
Maximum [km/h]	36,0	21,2	38,1	22,4

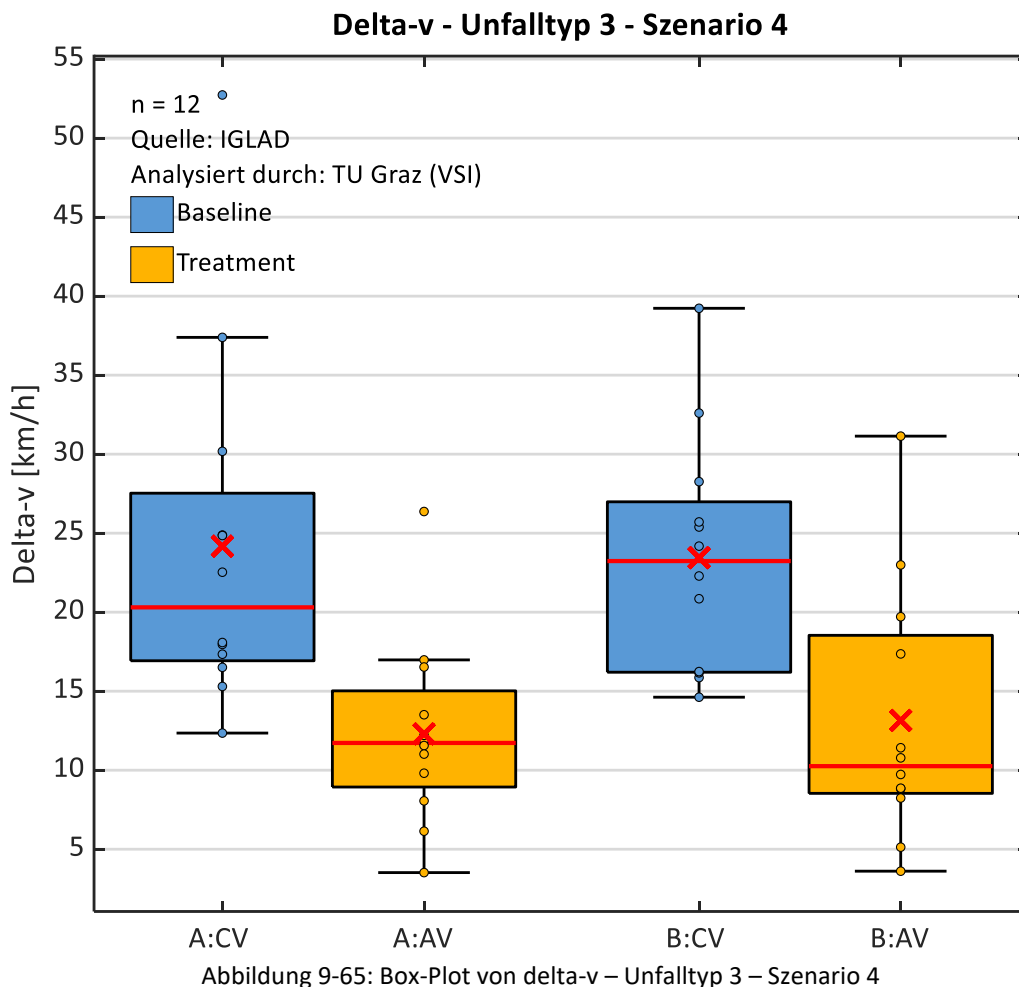


Tabelle 9-23: Statistische Kennwerte von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 4

delta-v - Unfalltyp 3 - Szenario 4				
	A:BL	A:AV	B:BL	B:AV
Number n []	12	12	12	12
Median [km/h]	20,3	11,7	23,2	10,3
Mean Value [km/h]	24,2	12,3	23,4	13,2
Standard deviation [km/h]	11,4	5,9	7,5	8,1
Variance [(km/h)^2]	130,0	34,6	55,8	65,3
Minimum [km/h]	12,4	3,5	14,6	3,6
Maximum [km/h]	52,7	26,4	39,2	31,1

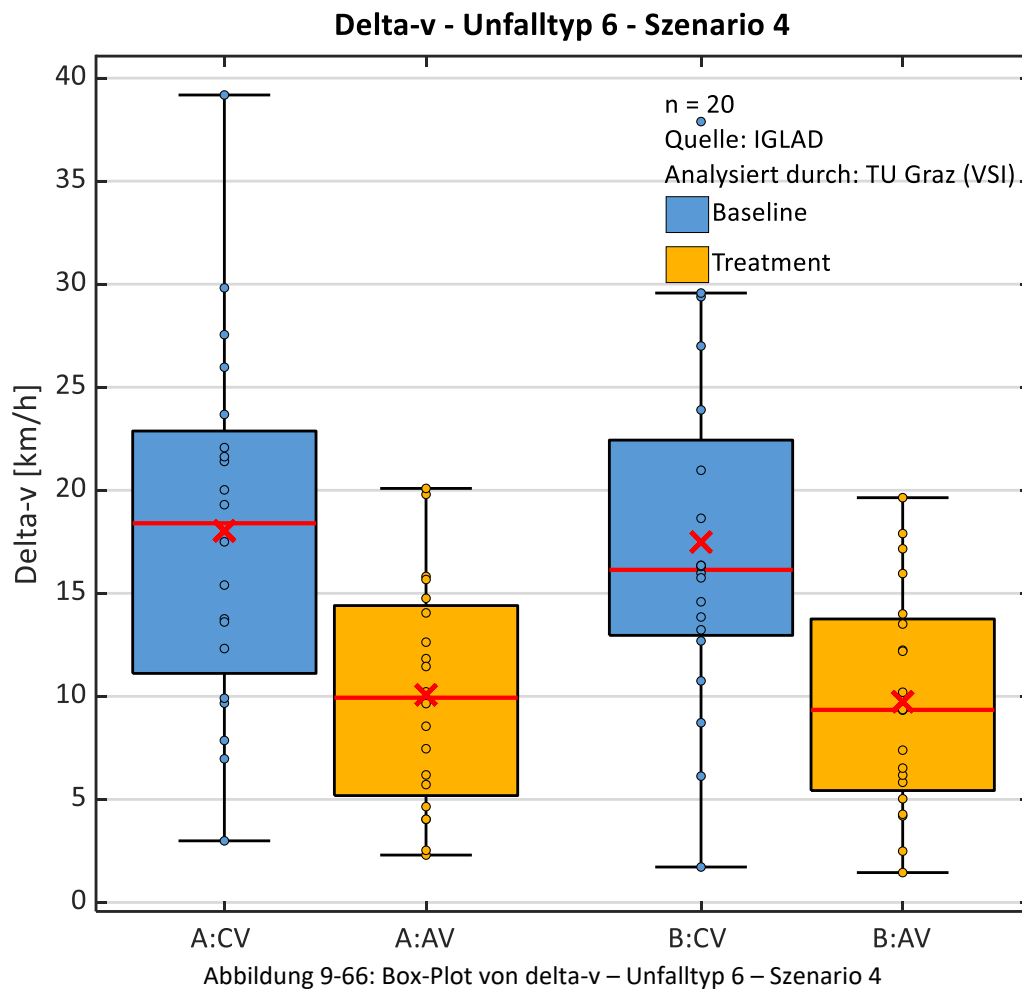


Tabelle 9-24: Statistische Kennwerte von delta-v – Unfalltyp 6 – Szenario 4

delta-v - Unfalltyp 6 - Szenario 4				
	A:BL	A:AV	B:BL	B:AV
Number n []	20	20	20	20
Median [km/h]	18,4	9,9	16,1	9,3
Mean Value [km/h]	18,0	10,1	17,5	9,7
Standard deviation [km/h]	8,8	5,5	8,6	5,4
Variance [(km/h) ²]	78,1	30,1	74,8	29,0
Minimum [km/h]	3,0	2,3	1,7	1,5
Maximum [km/h]	39,2	20,1	37,9	19,6

B.3.2 Verteilung des delta-v

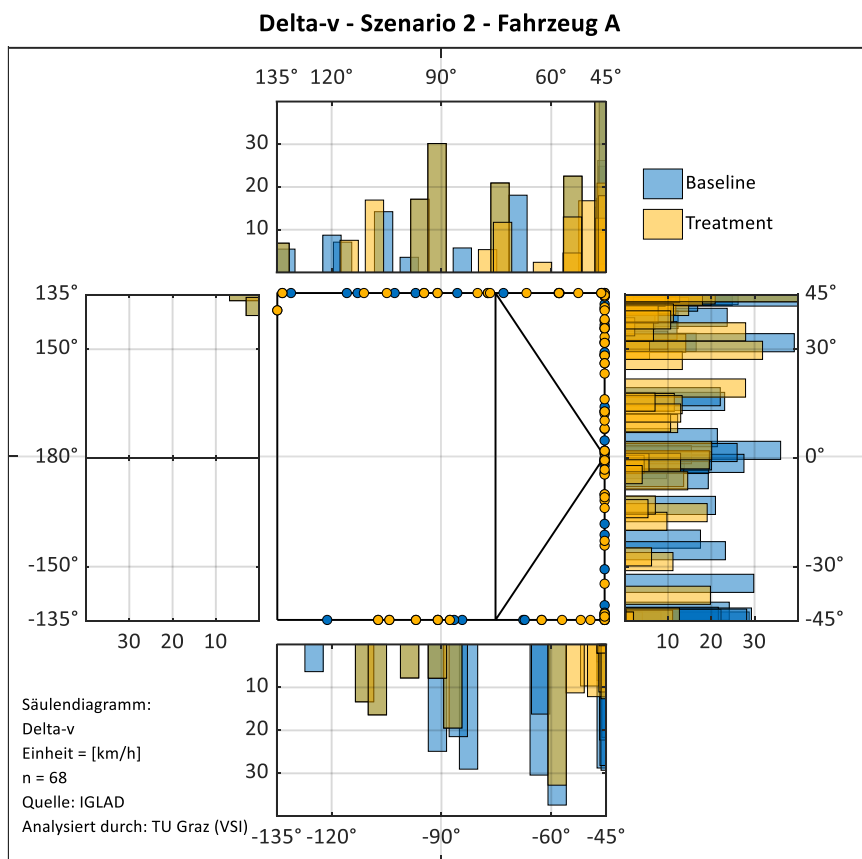


Abbildung 9-67: Verteilung von delta-v – Szenario 2 – Fahrzeug A

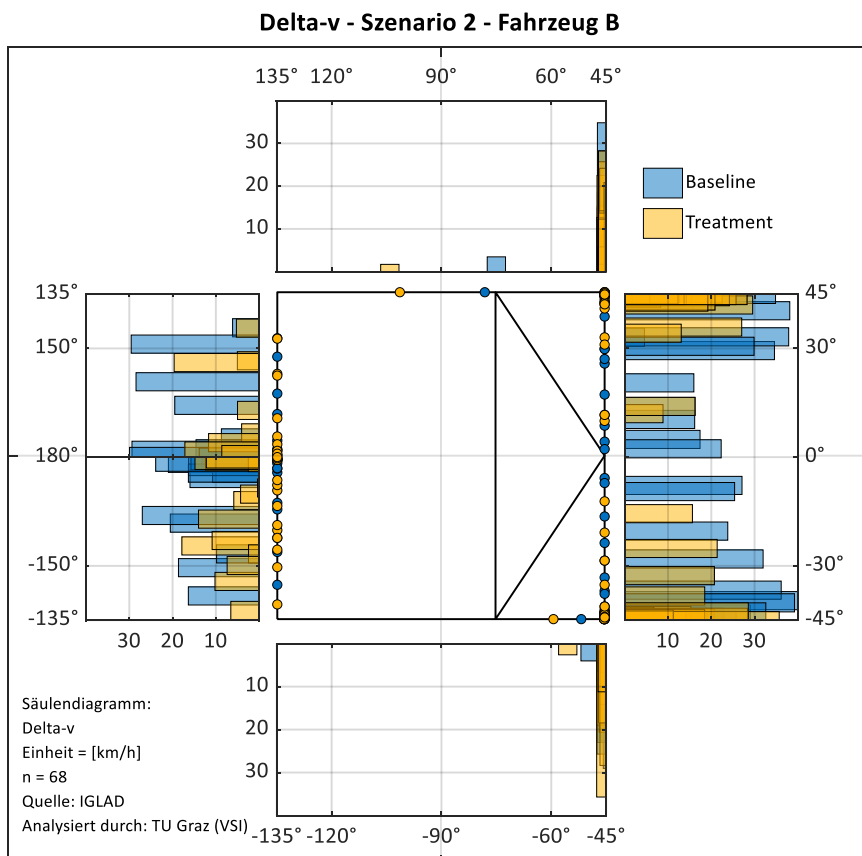


Abbildung 9-68: Verteilung von delta-v – Szenario 2 – Fahrzeug B

Delta-v - Unfalltyp 2 - Szenario 2 - Fahrzeug A

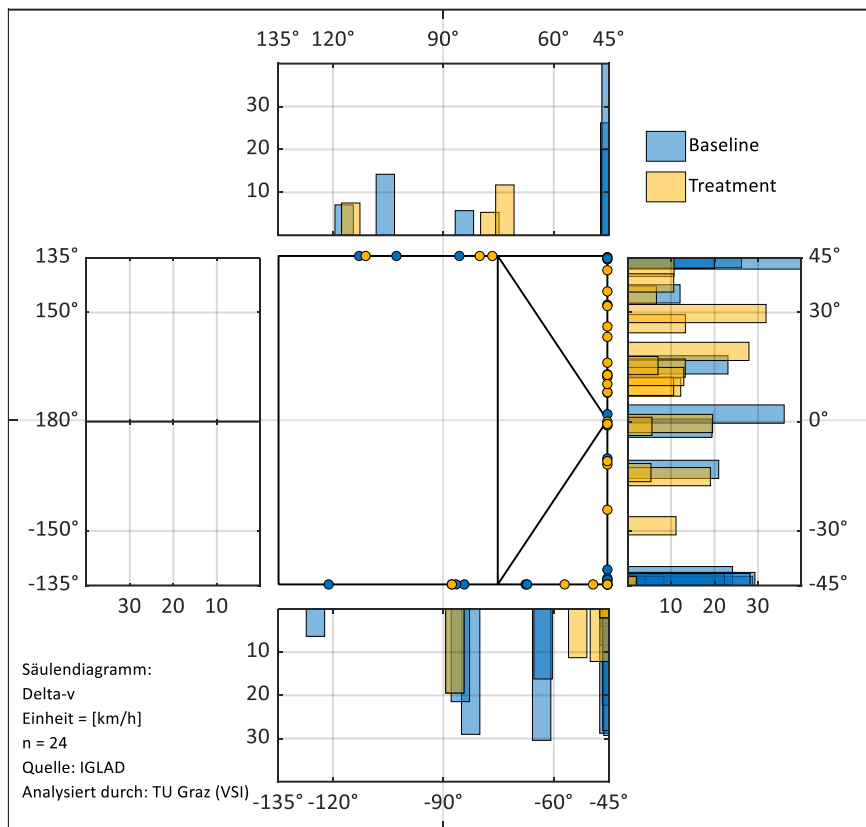


Abbildung 9-69: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 2 – Szenario 2 – Fahrzeug A

Delta-v - Unfalltyp 2 - Szenario 2 - Fahrzeug B

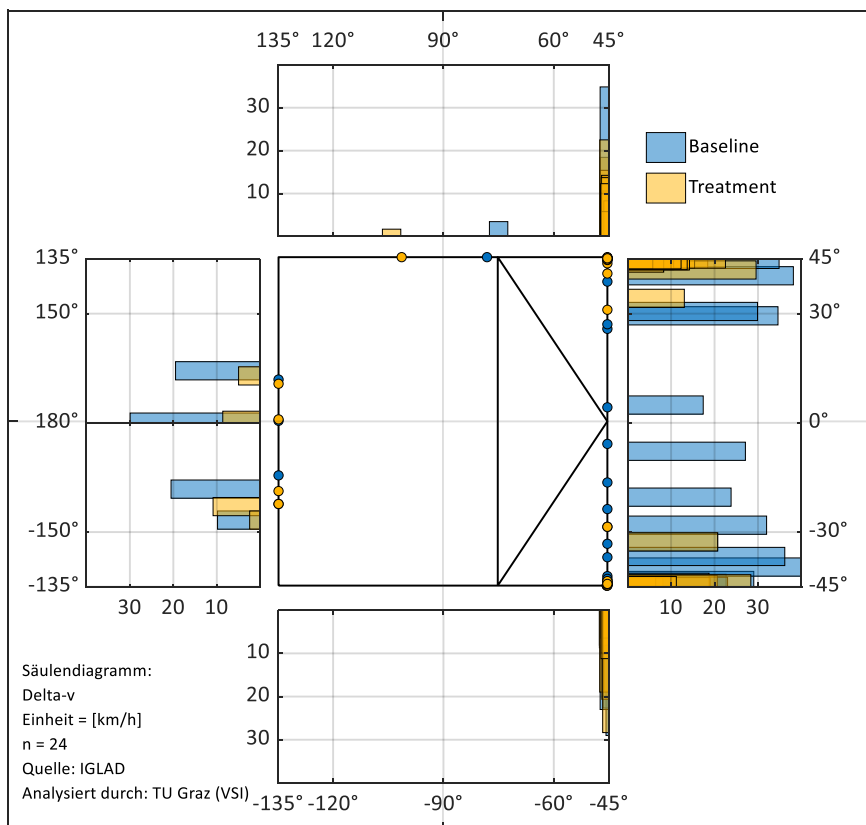


Abbildung 9-70: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 2 – Szenario 2 – Fahrzeug B

Delta-v - Unfalltyp 3 - Szenario 2 - Fahrzeug A

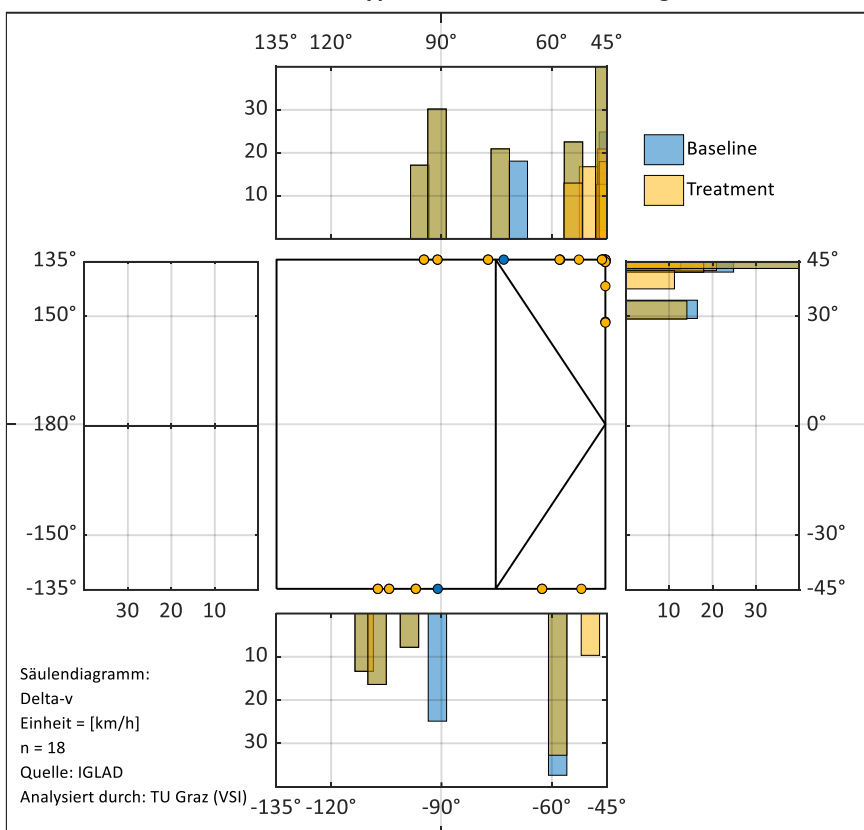


Abbildung 9-71: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 2 – Fahrzeug A

Delta-v - Unfalltyp 3 - Szenario 2 - Fahrzeug B

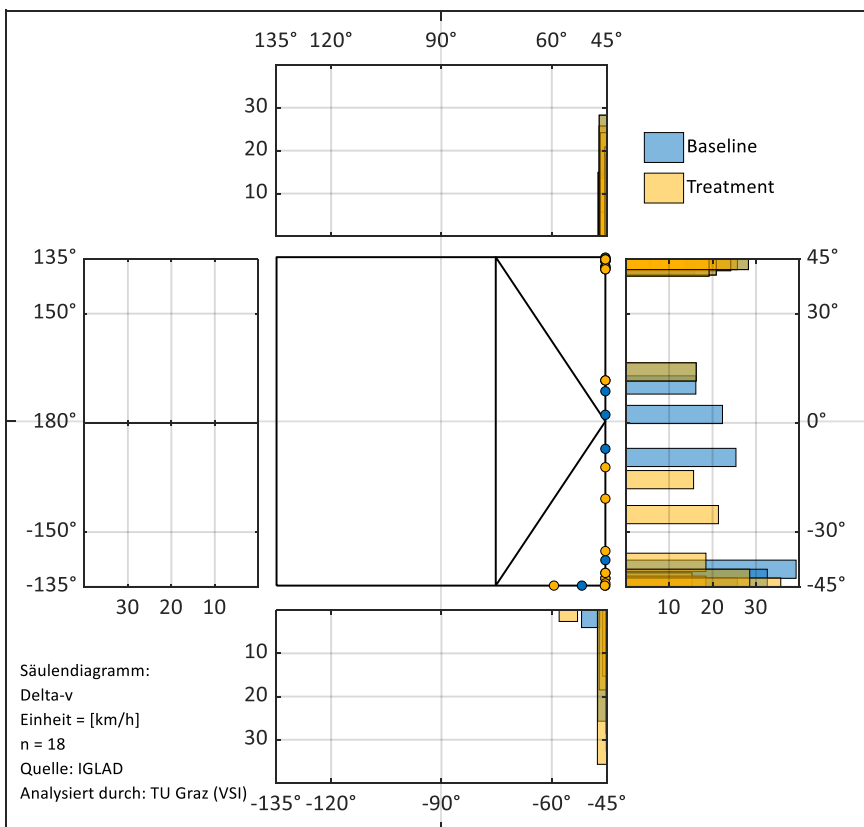


Abbildung 9-72: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 2 – Fahrzeug B

Delta-v - Unfalltyp 6 - Szenario 2 - Fahrzeug A

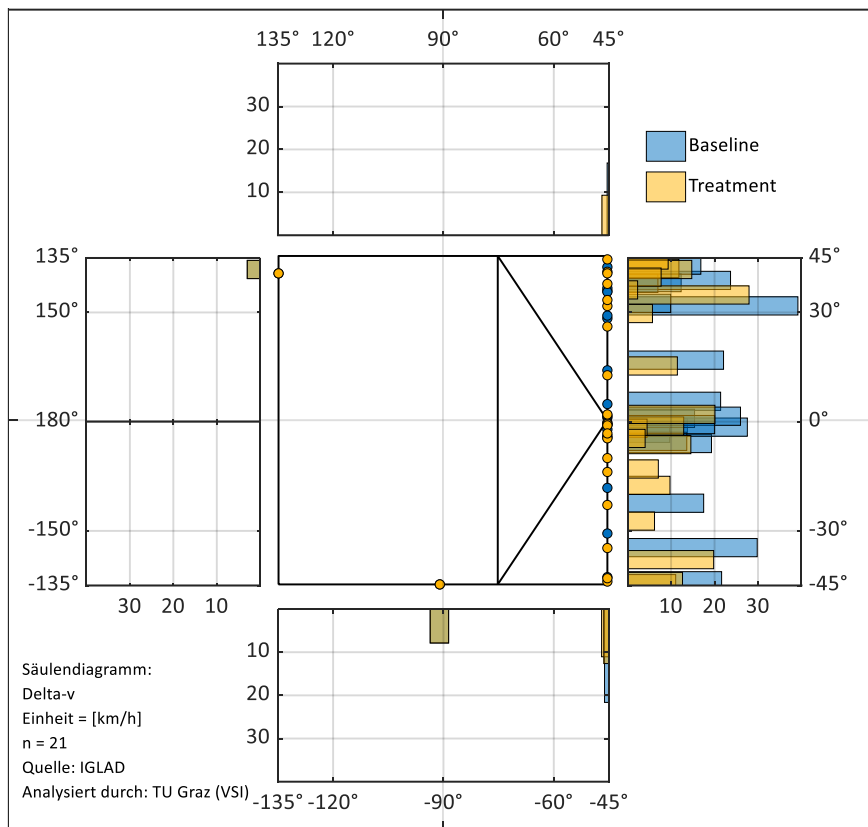


Abbildung 9-73: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 6 – Szenario 2 – Fahrzeug A

Delta-v - Unfalltyp 6 - Szenario 2 - Fahrzeug B

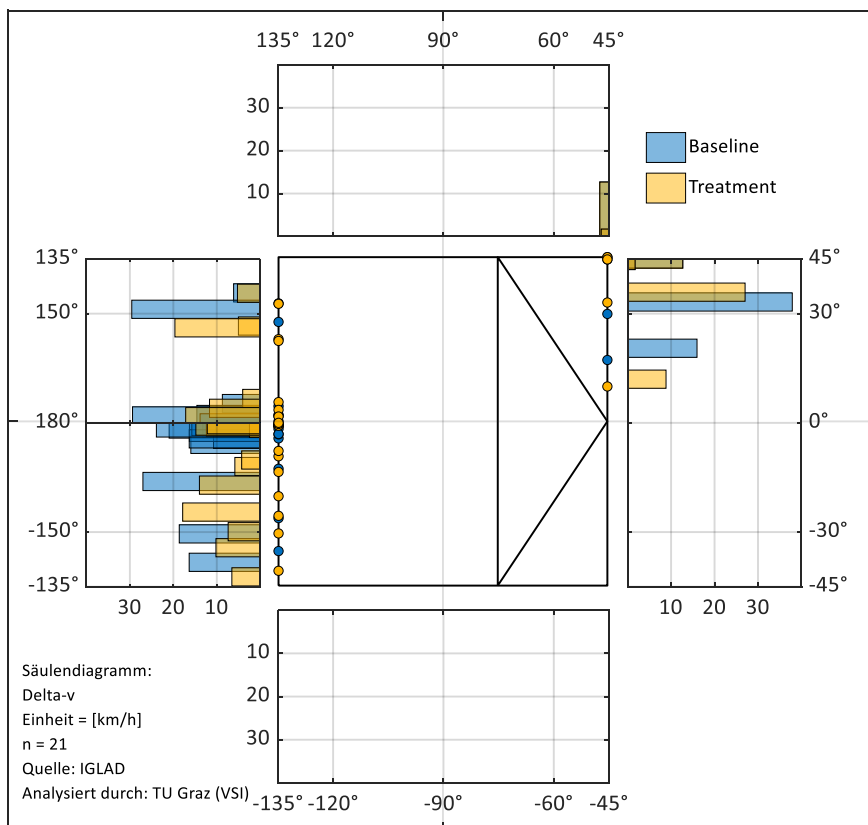


Abbildung 9-74: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 6 – Szenario 2 – Fahrzeug B

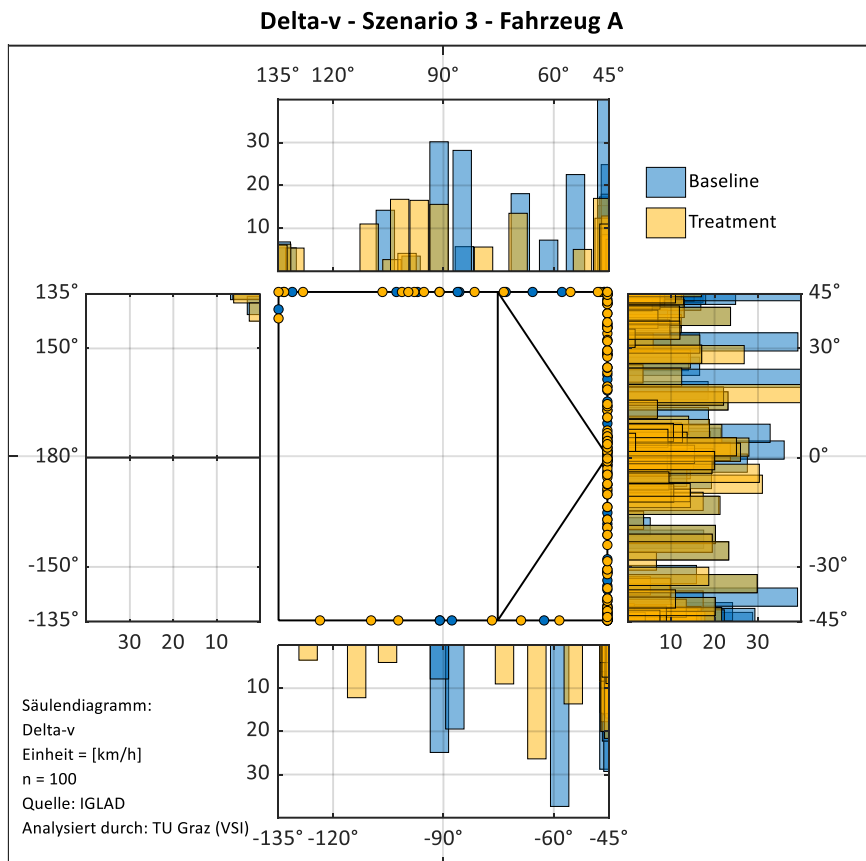


Abbildung 9-75: Verteilung von delta-v – Szenario 3 – Fahrzeug A

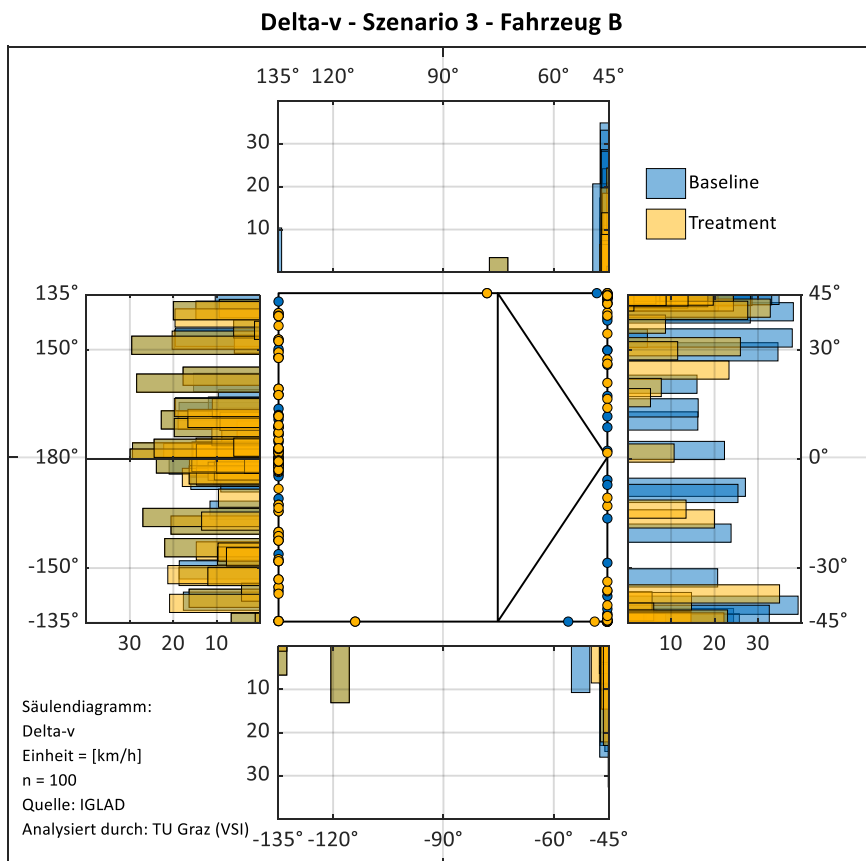


Abbildung 9-76: Verteilung von delta-v – Szenario 3 – Fahrzeug B

Delta-v - Unfalltyp 2 - Szenario 3 - Fahrzeug A

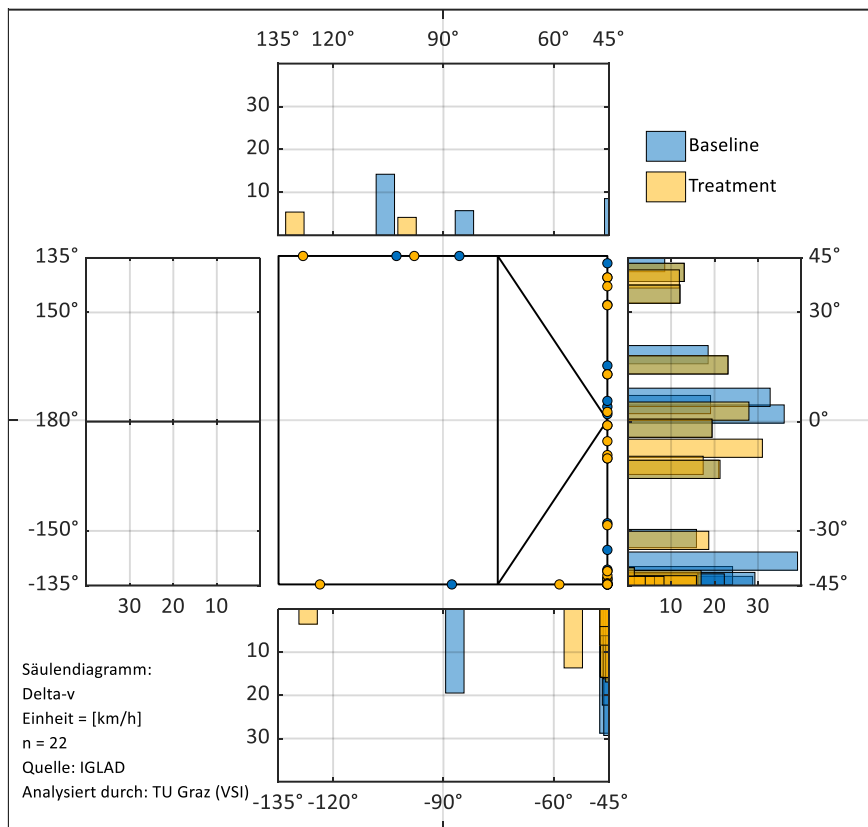


Abbildung 9-77: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 2 – Szenario 3 – Fahrzeug A

Delta-v - Unfalltyp 2 - Szenario 3 - Fahrzeug B

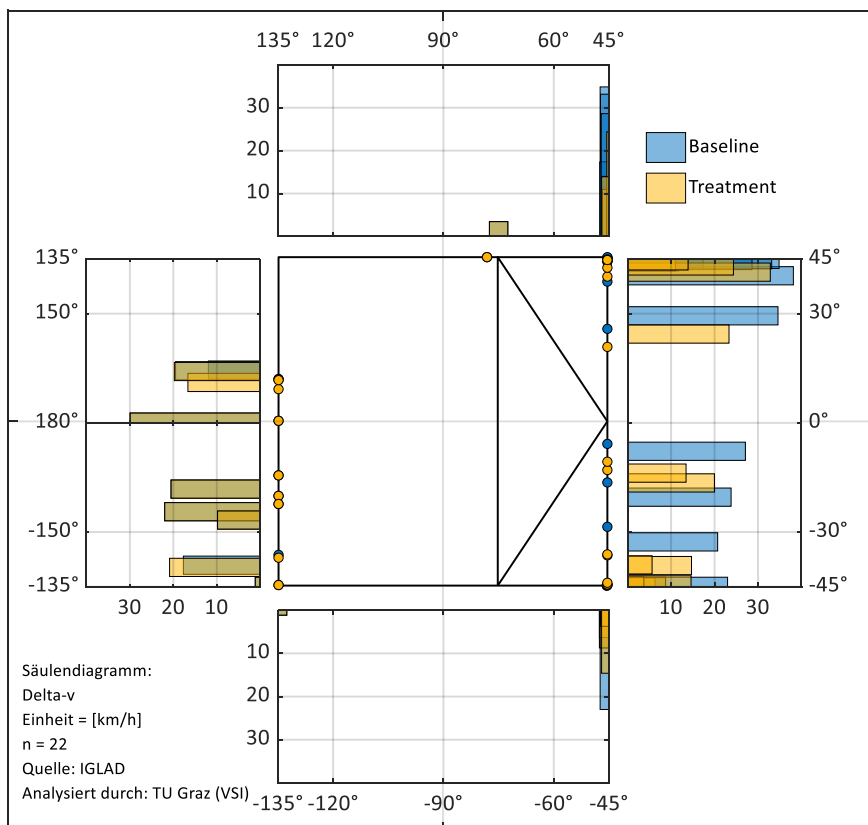


Abbildung 9-78: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 2 – Szenario 3 – Fahrzeug B

Delta-v - Unfalltyp 3 - Szenario 3 - Fahrzeug A

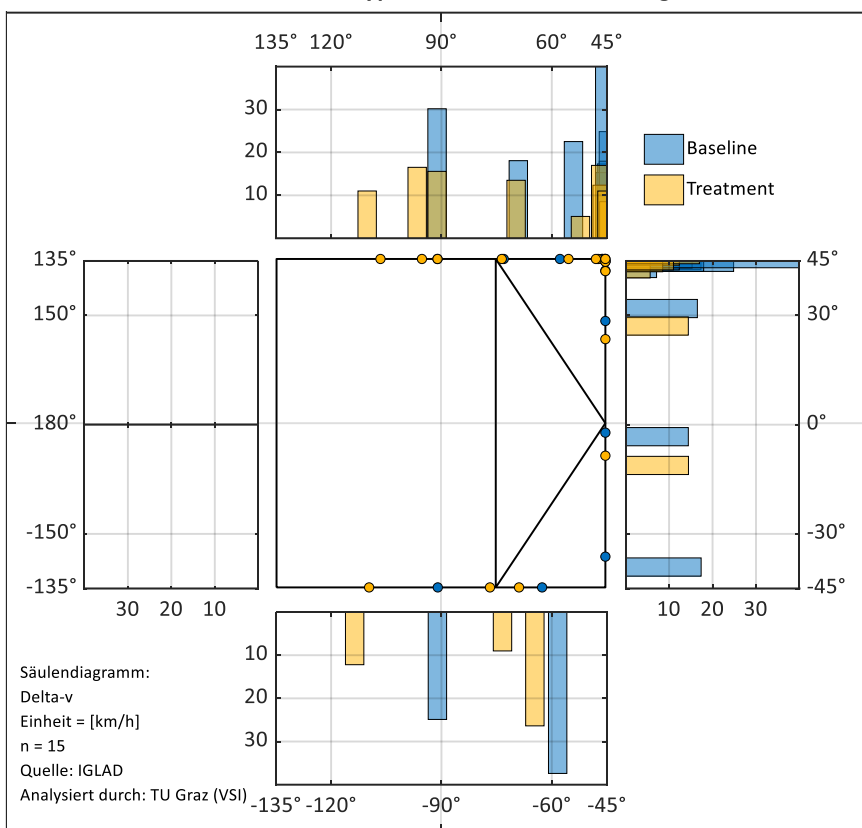


Abbildung 9-79: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 3 – Fahrzeug A

Delta-v - Unfalltyp 3 - Szenario 3 - Fahrzeug B

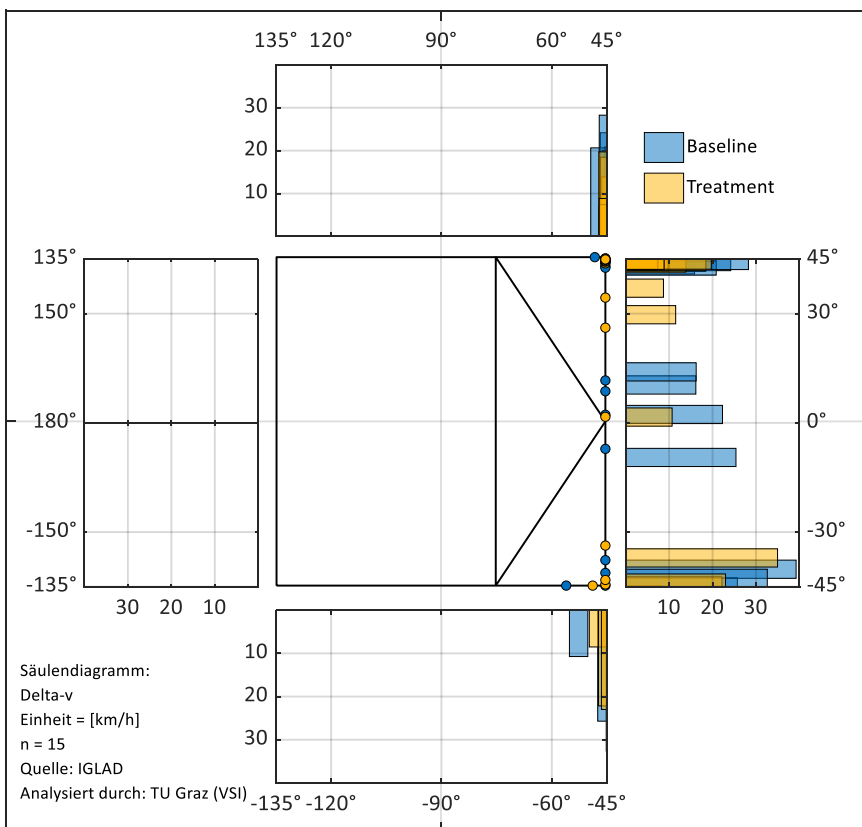


Abbildung 9-80: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 3 – Fahrzeug B

Delta-v - Unfalltyp 6 - Szenario 3 - Fahrzeug A

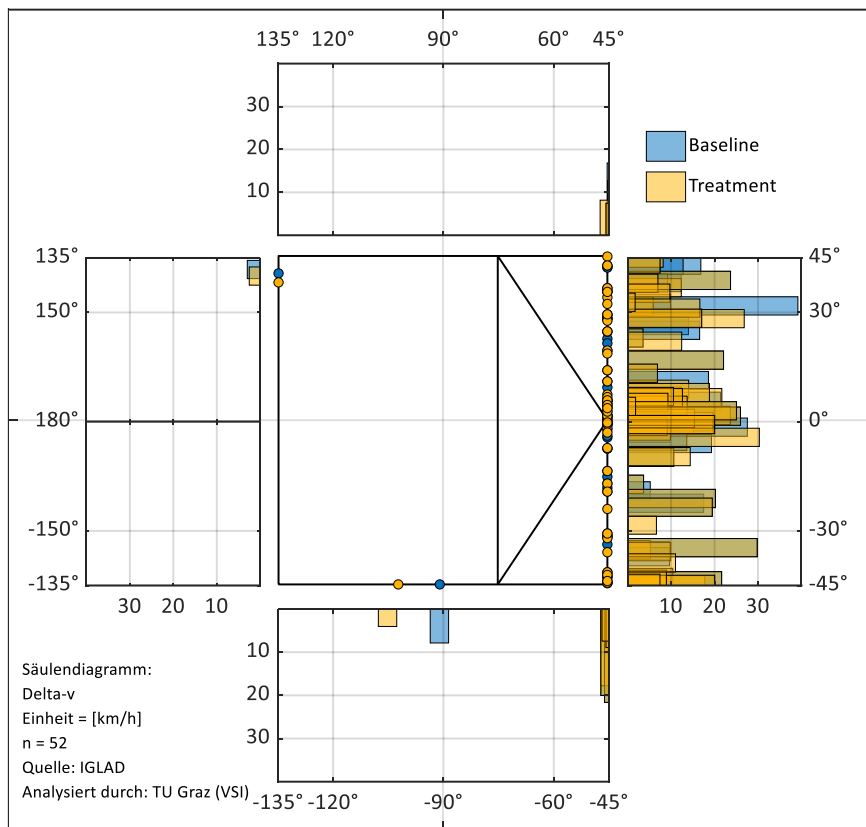


Abbildung 9-81: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 6 – Szenario 3 – Fahrzeug A

Delta-v - Unfalltyp 6 - Szenario 3 - Fahrzeug B

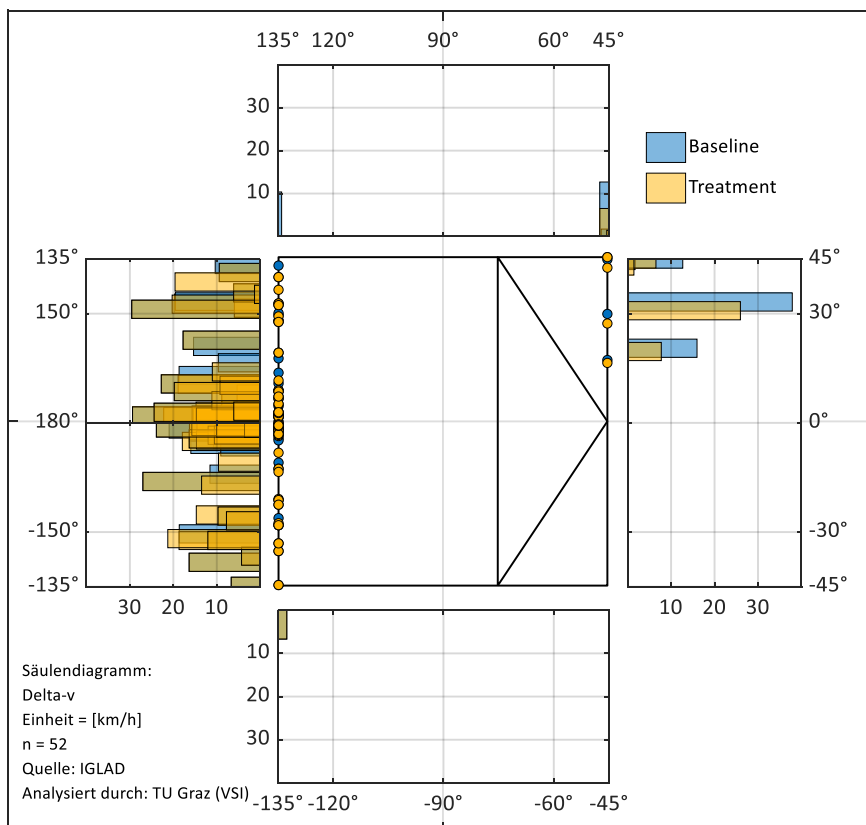


Abbildung 9-82: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 6 – Szenario 3 – Fahrzeug B

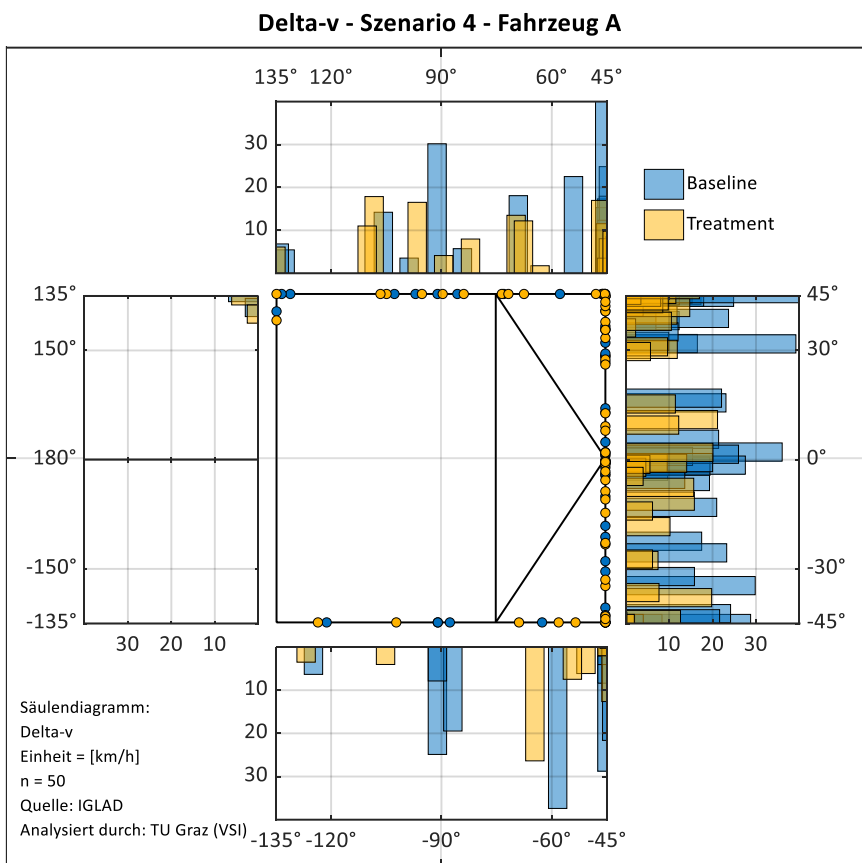


Abbildung 9-83: Verteilung von delta-v – Szenario 4 – Fahrzeug A

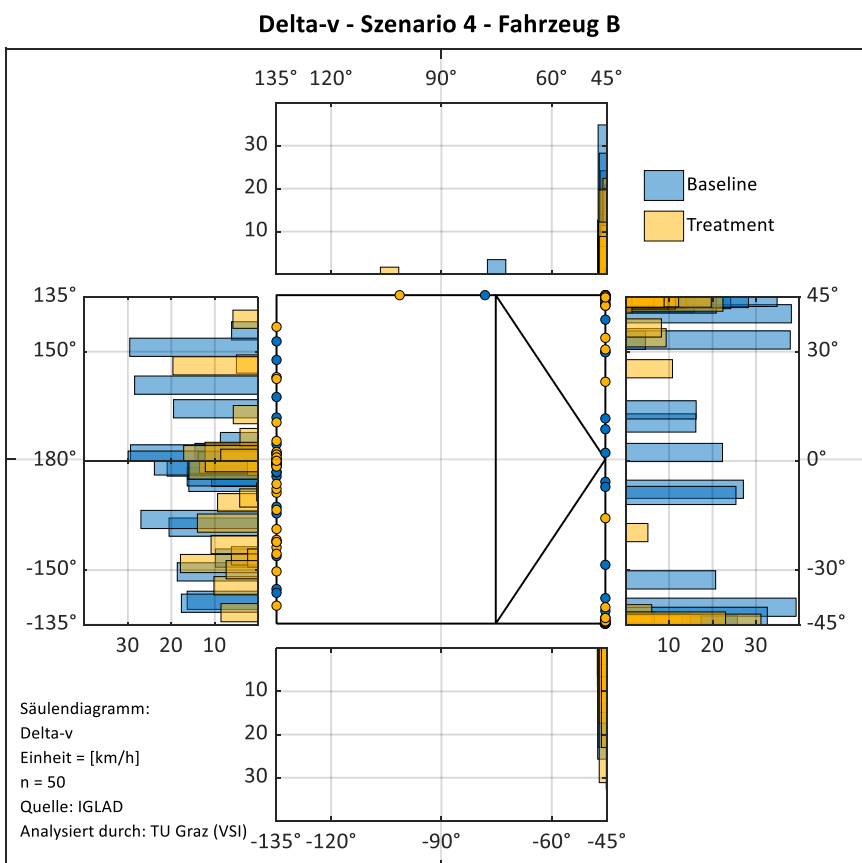


Abbildung 9-84: Verteilung von delta-v – Szenario 4 – Fahrzeug B

Delta-v - Unfalltyp 2 - Szenario 4 - Fahrzeug A

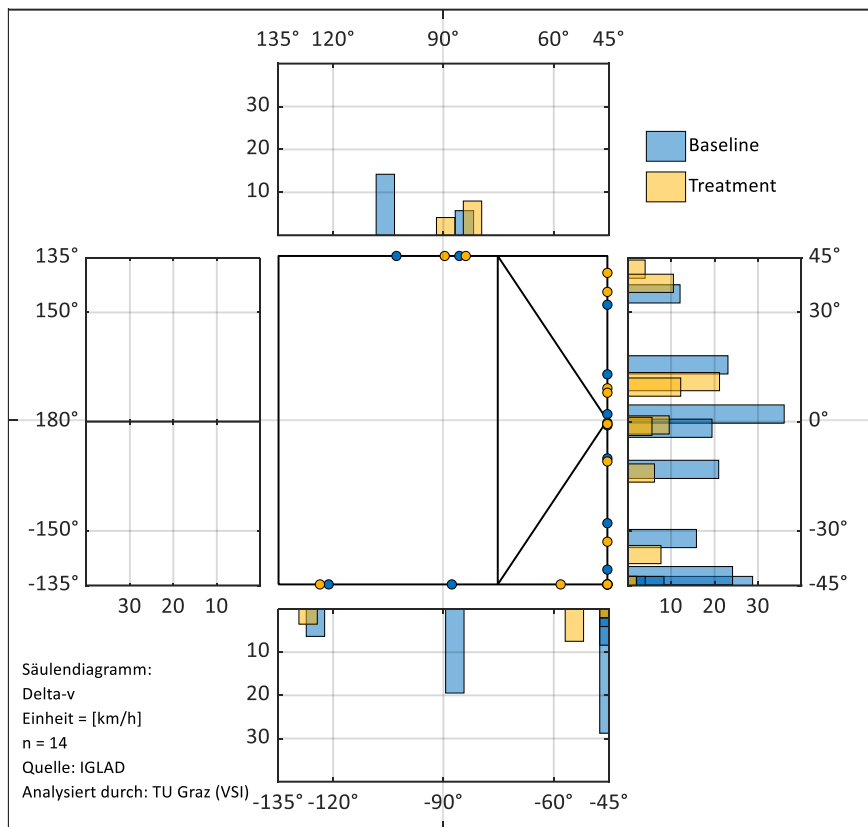


Abbildung 9-85: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 2 – Szenario 4 – Fahrzeug A

Delta-v - Unfalltyp 2 - Szenario 4 - Fahrzeug B

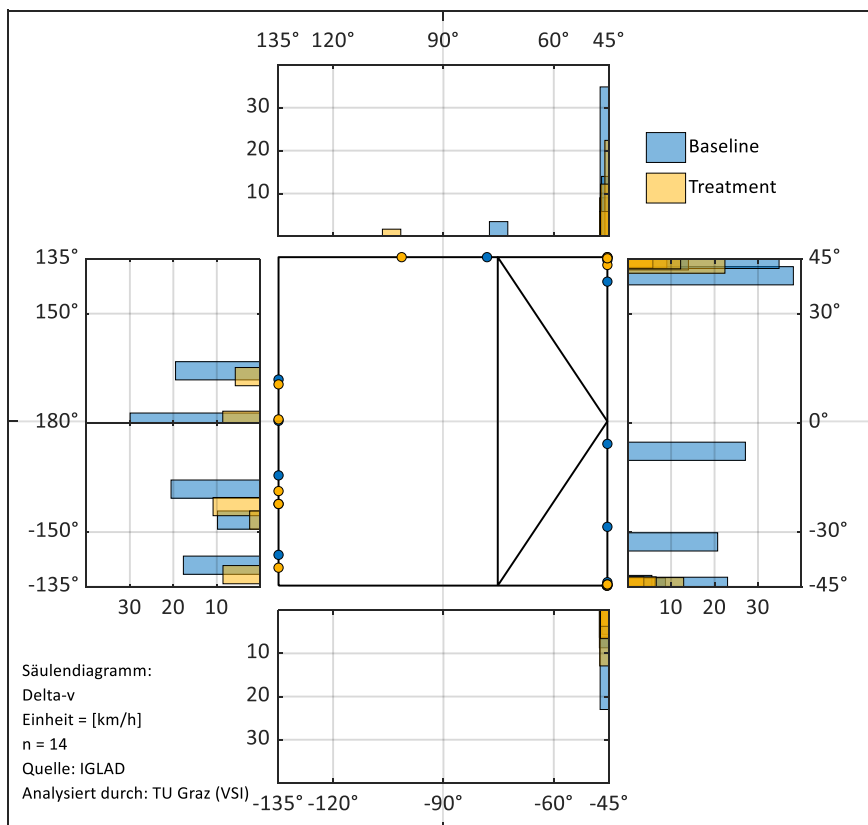


Abbildung 9-86: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 2 – Szenario 4 – Fahrzeug B

Delta-v - Unfalltyp 3 - Szenario 4 - Fahrzeug A

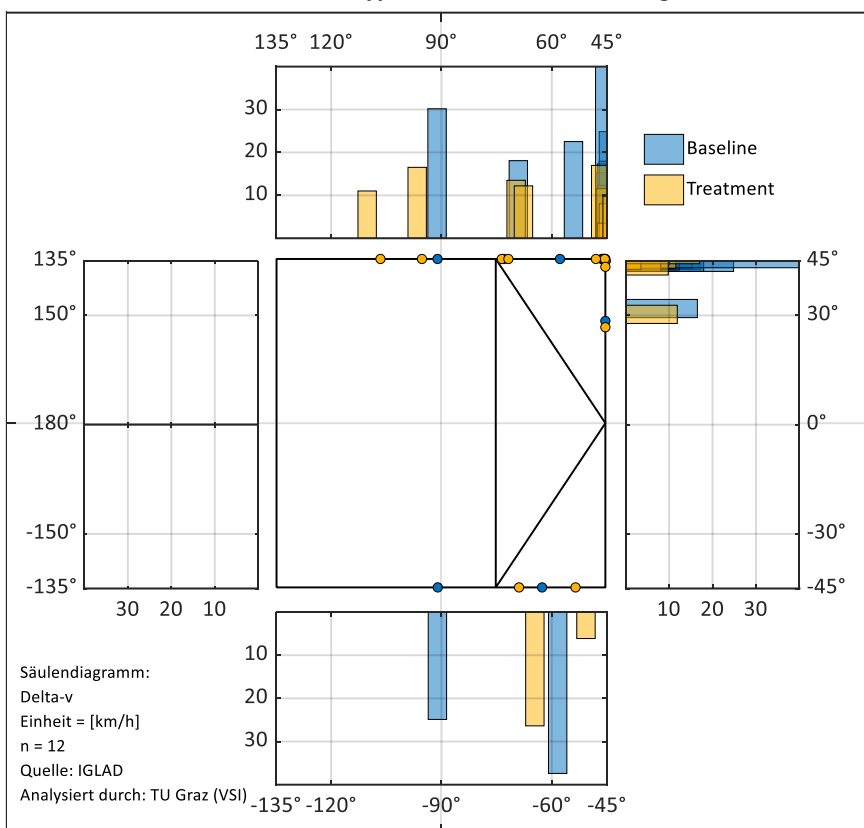


Abbildung 9-87: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 4 – Fahrzeug A

Delta-v - Unfalltyp 3 - Szenario 4 - Fahrzeug B

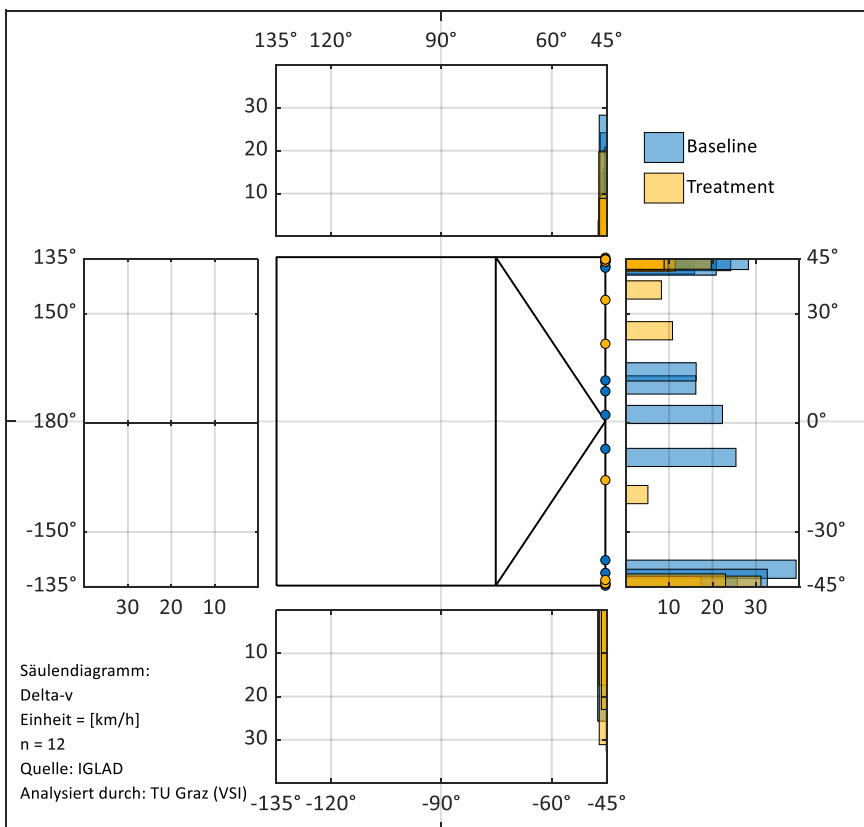


Abbildung 9-88: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 3 – Szenario 4 – Fahrzeug B

Delta-v - Unfalltyp 6 - Szenario 4 - Fahrzeug A

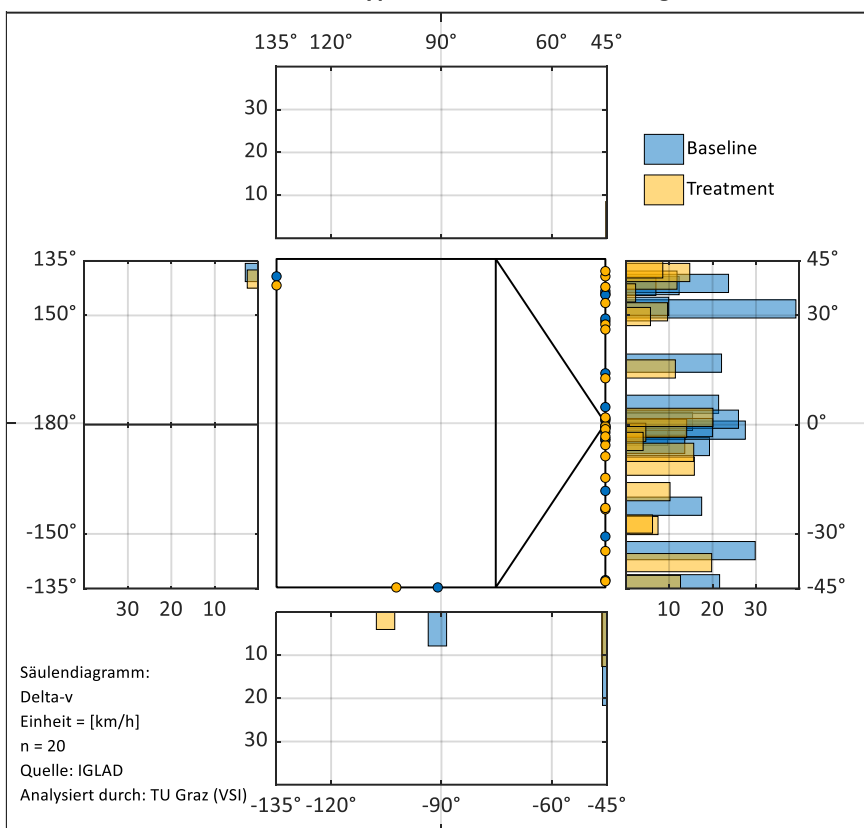


Abbildung 9-89: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 6 – Szenario 4 – Fahrzeug A

Delta-v - Unfalltyp 6 - Szenario 4 - Fahrzeug B

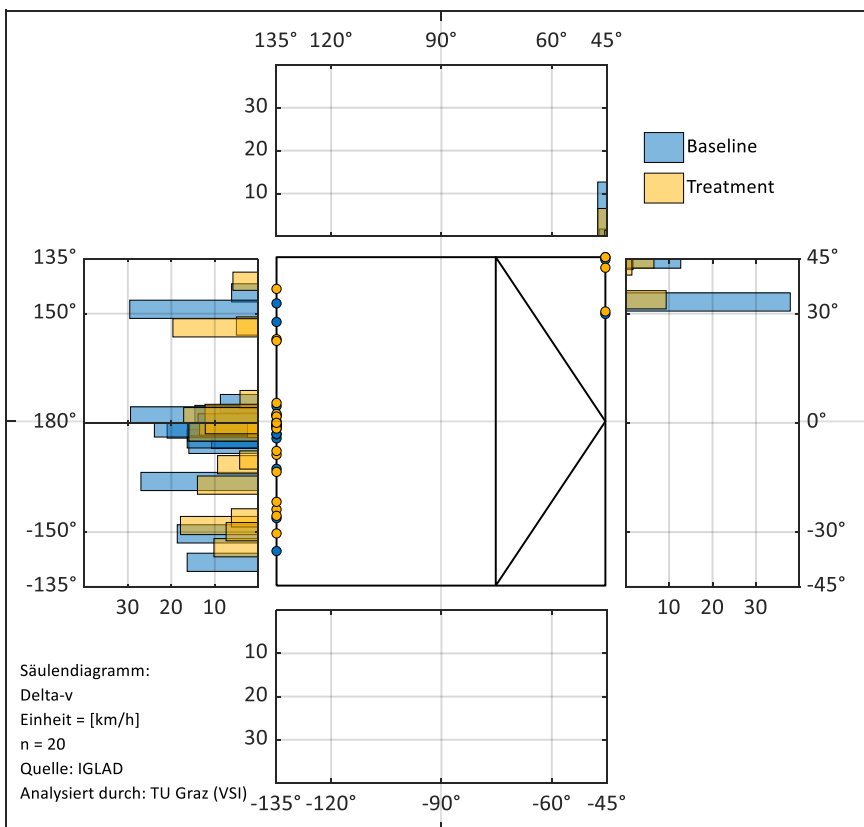


Abbildung 9-90: Verteilung von delta-v – Unfalltyp 6 – Szenario 4 – Fahrzeug B

B.4 Kollisionskonfiguration

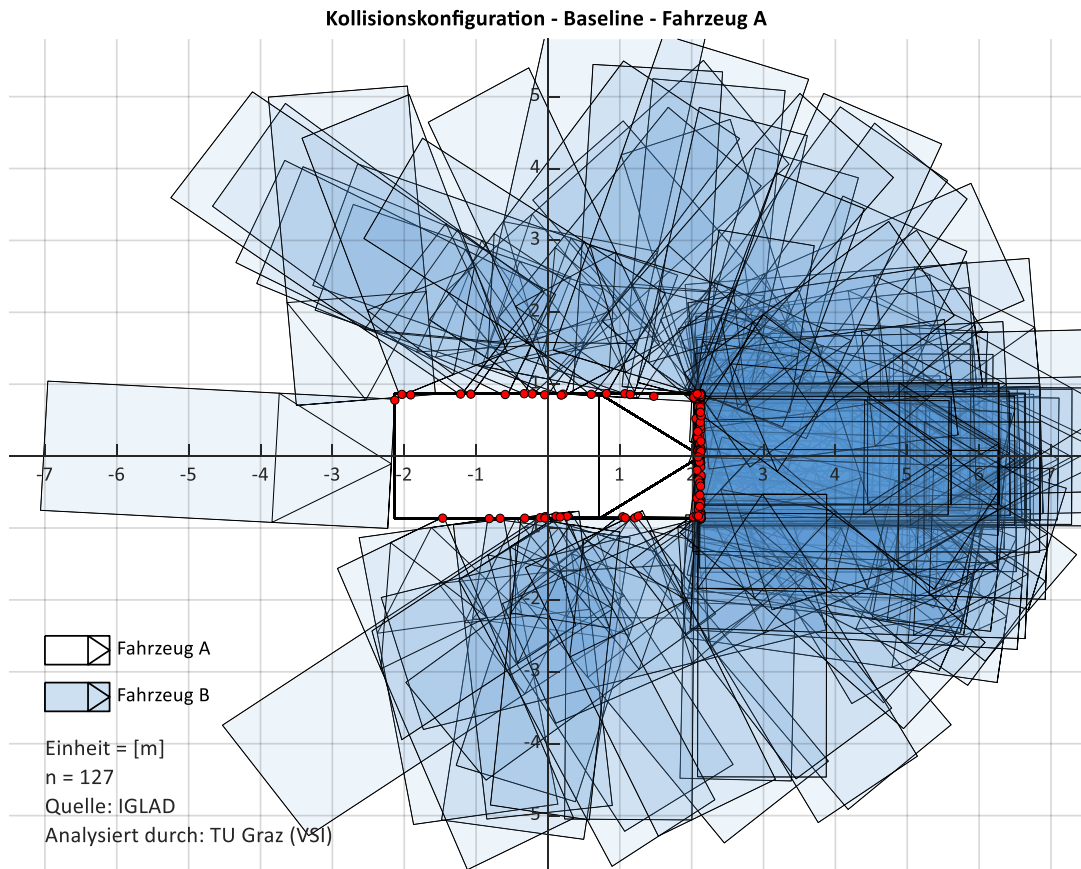


Abbildung 9-91: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Baseline)

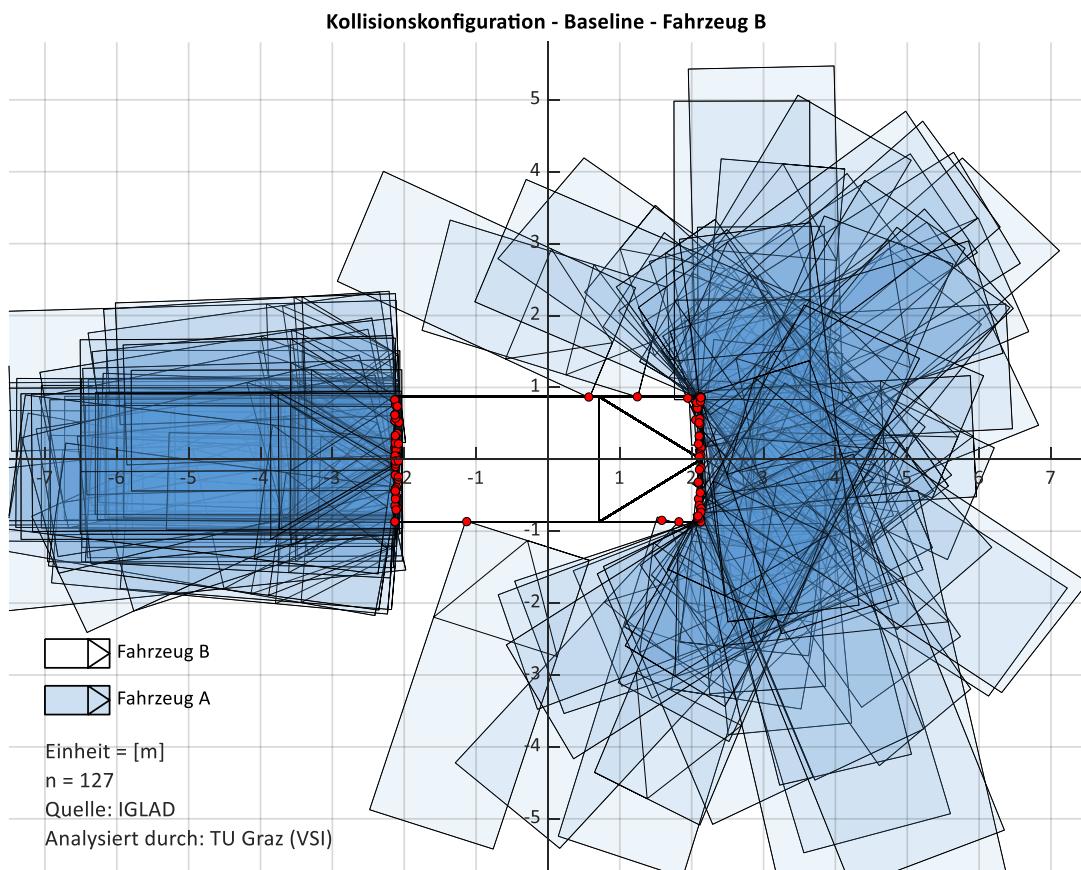


Abbildung 9-92: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Baseline)

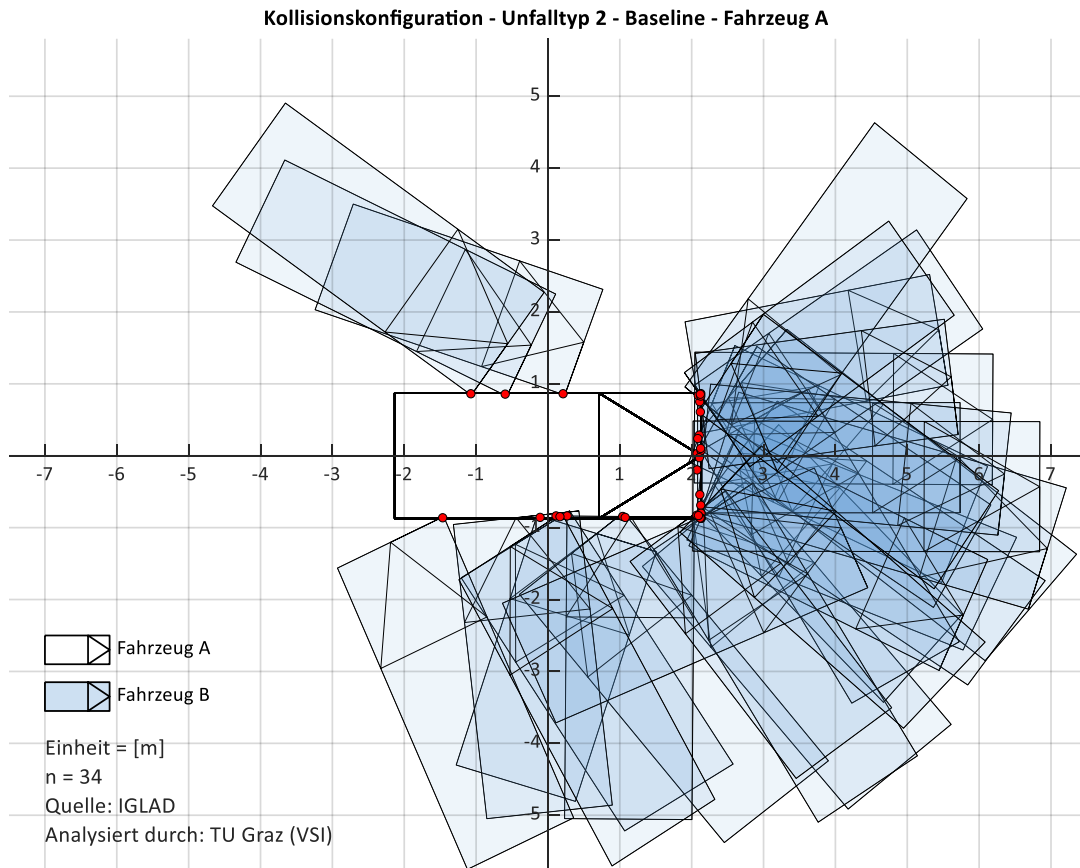


Abbildung 9-93: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 2 - Baseline)

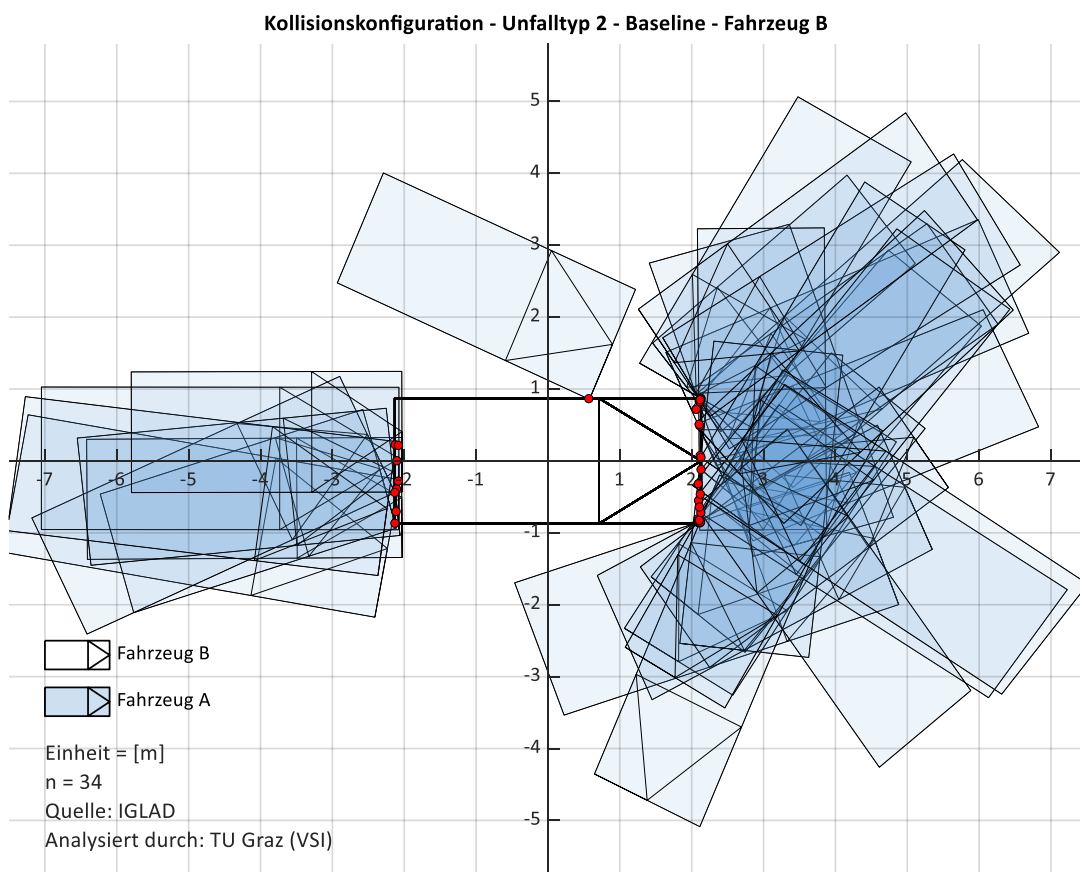


Abbildung 9-94: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 2 - Baseline)

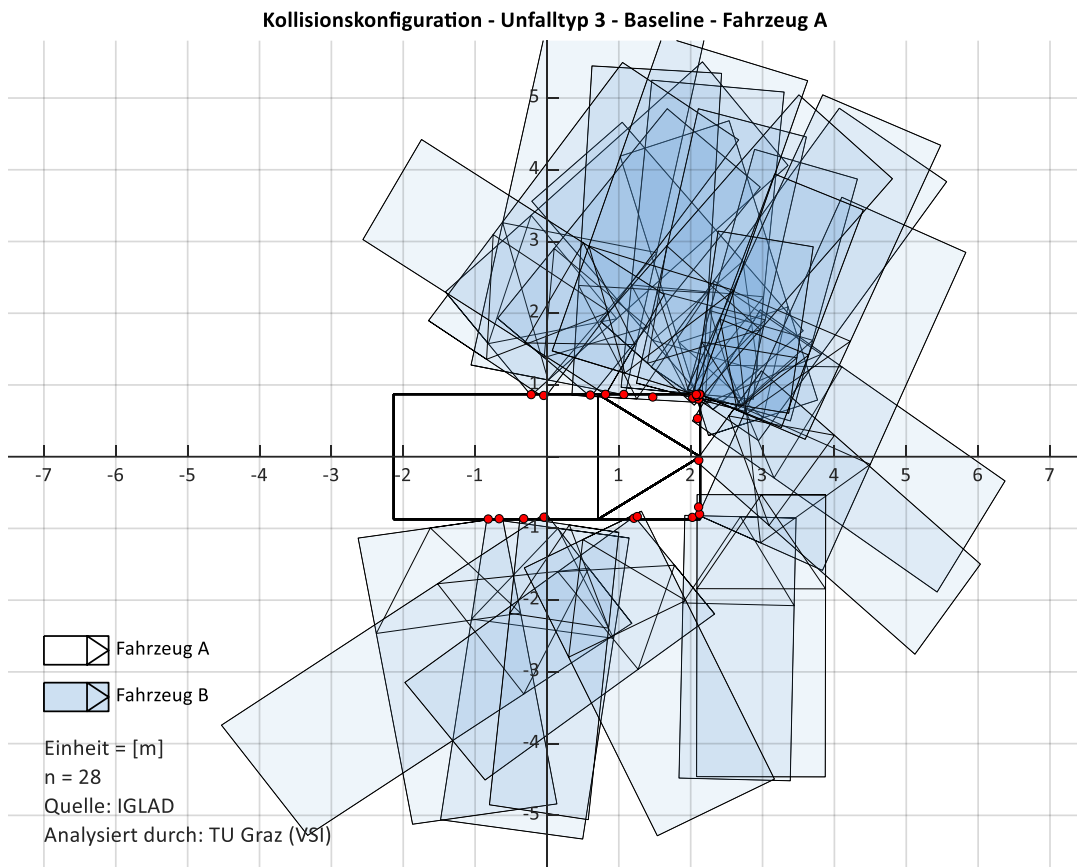


Abbildung 9-95: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 3 - Baseline)

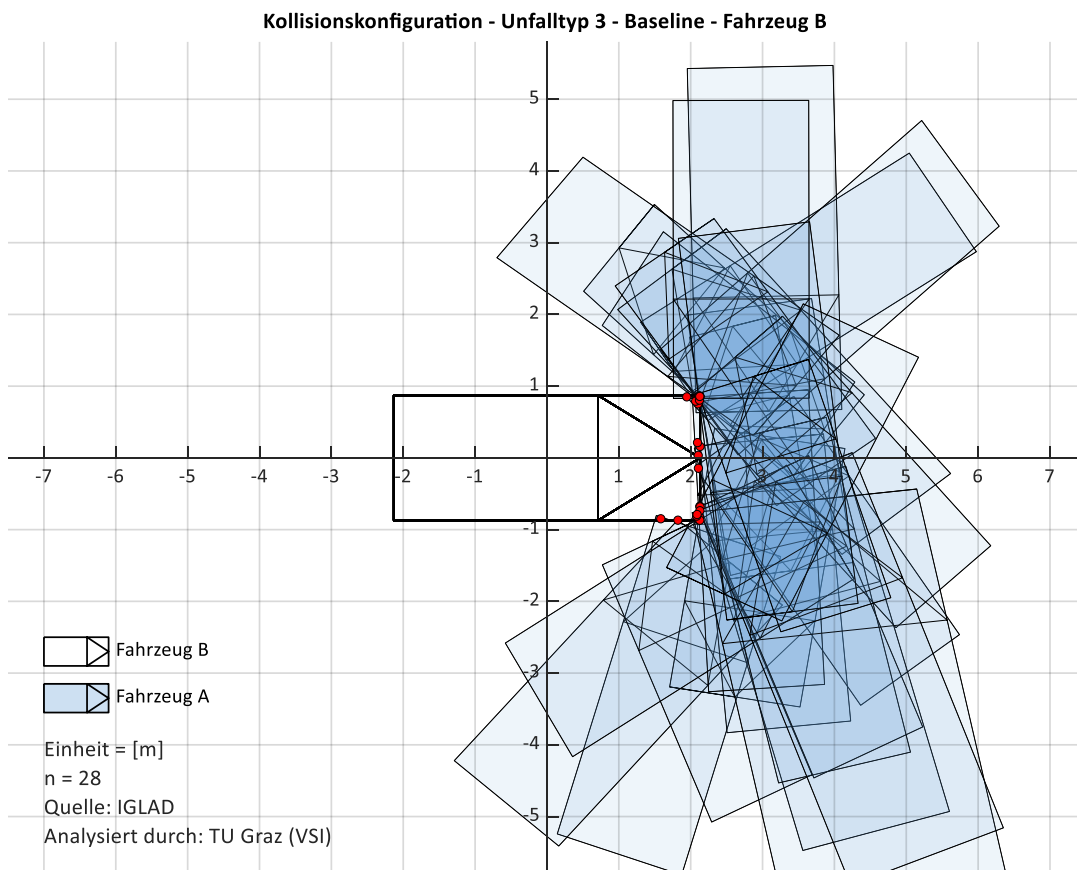


Abbildung 9-96: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 3 - Baseline)

Kollisionskonfiguration - Unfalltyp 6 - Baseline - Fahrzeug A

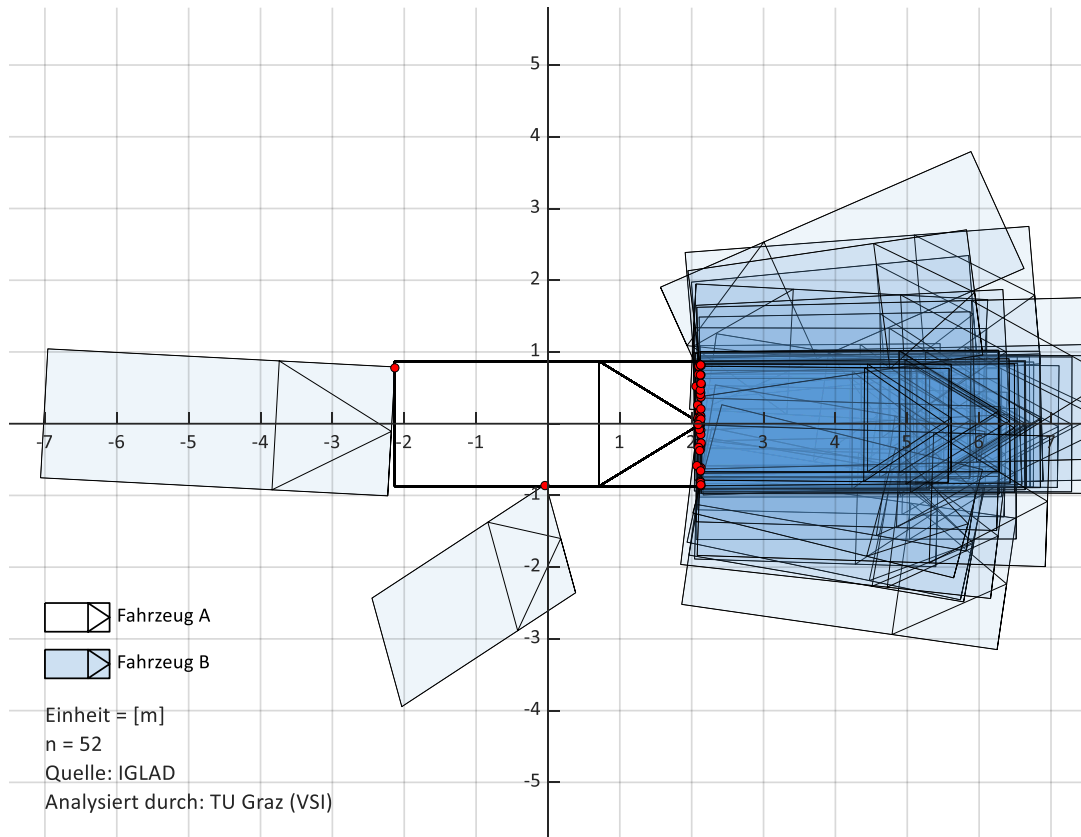


Abbildung 9-97: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 6 - Baseline)

Kollisionskonfiguration - Unfalltyp 6 - Baseline - Fahrzeug B

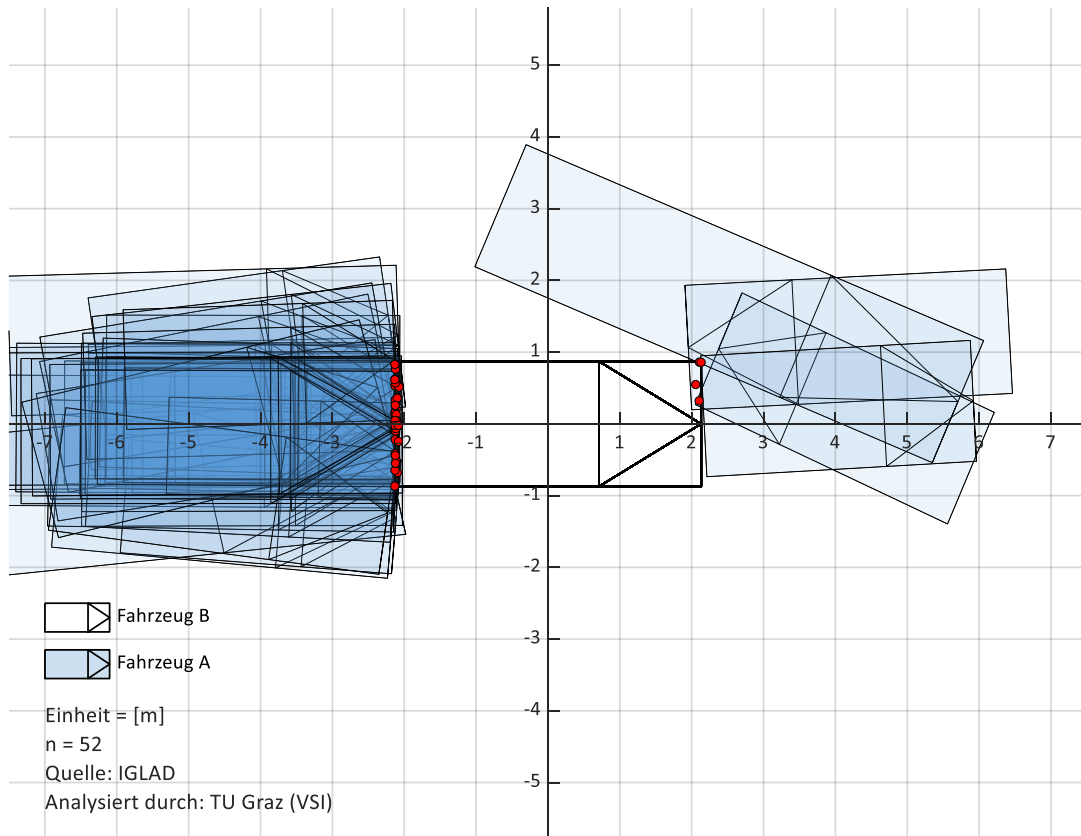


Abbildung 9-98: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 6 - Baseline)

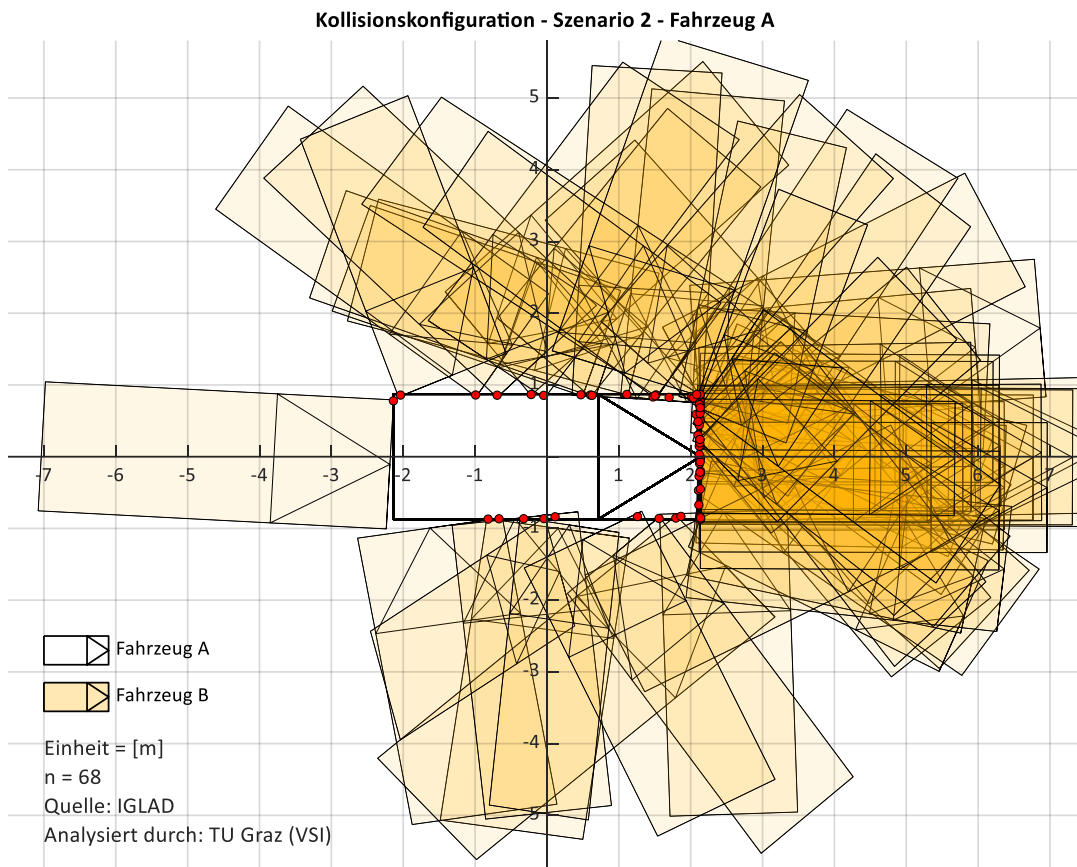


Abbildung 9-99: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Szenario 2)

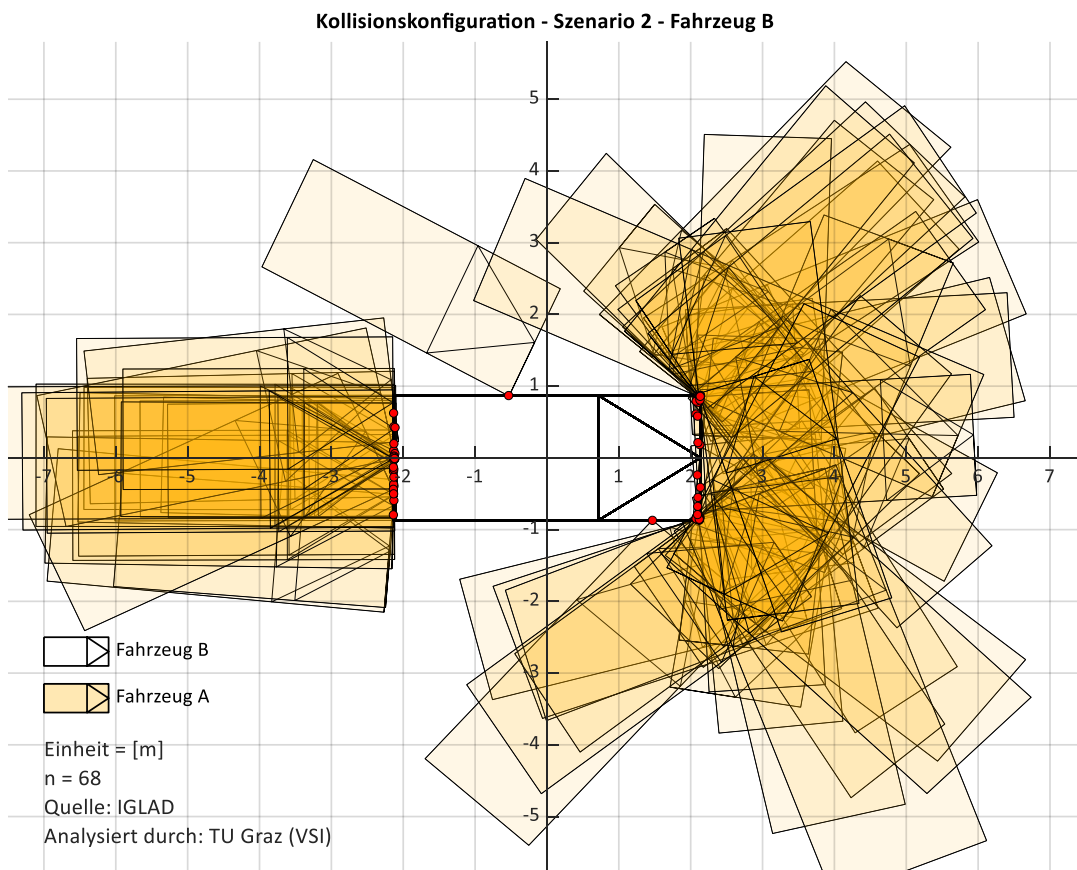


Abbildung 9-100: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Szenario 2)

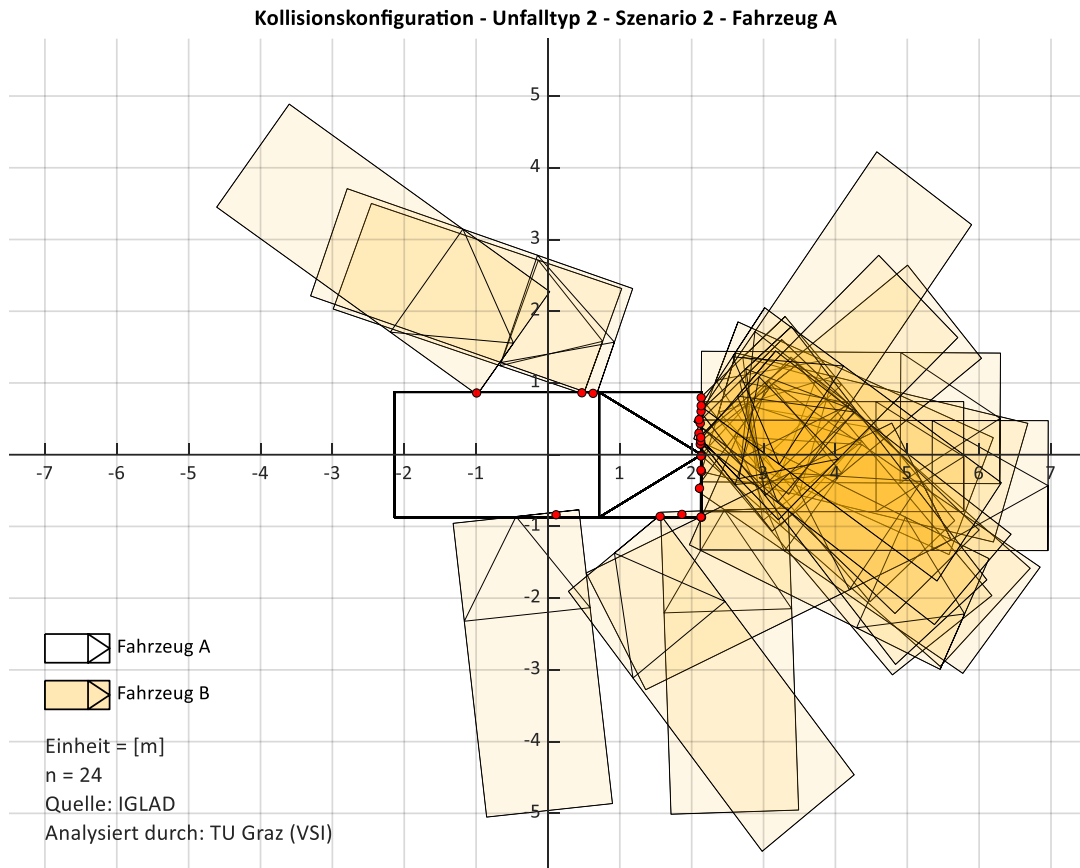


Abbildung 9-101: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 2 - Szenario 2)

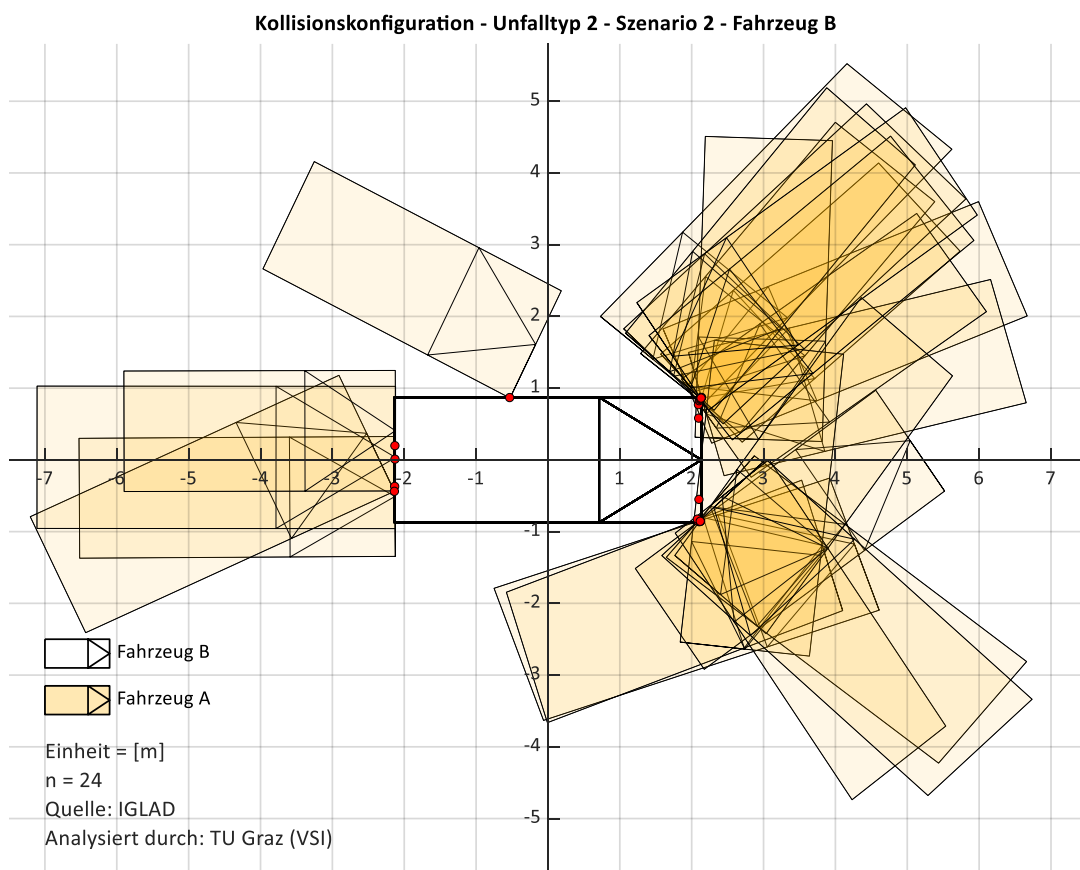


Abbildung 9-102: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 2 - Szenario 2)

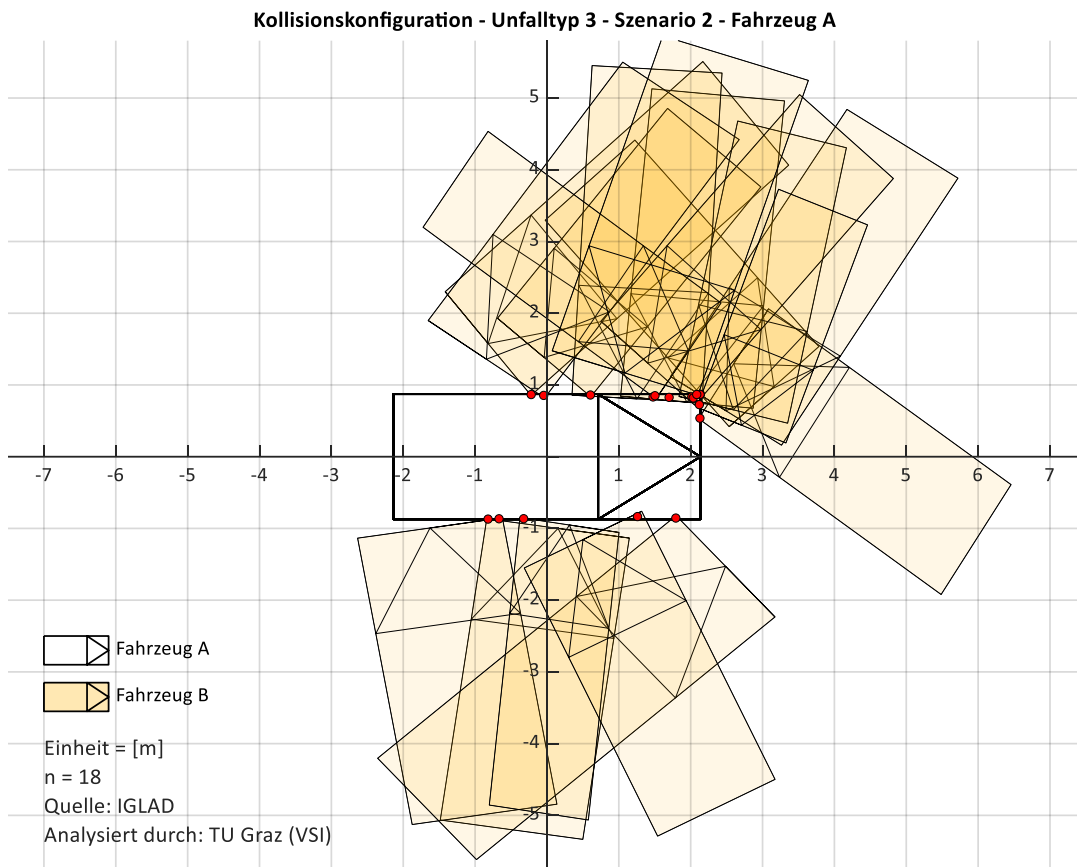


Abbildung 9-103: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 3 - Szenario 2)

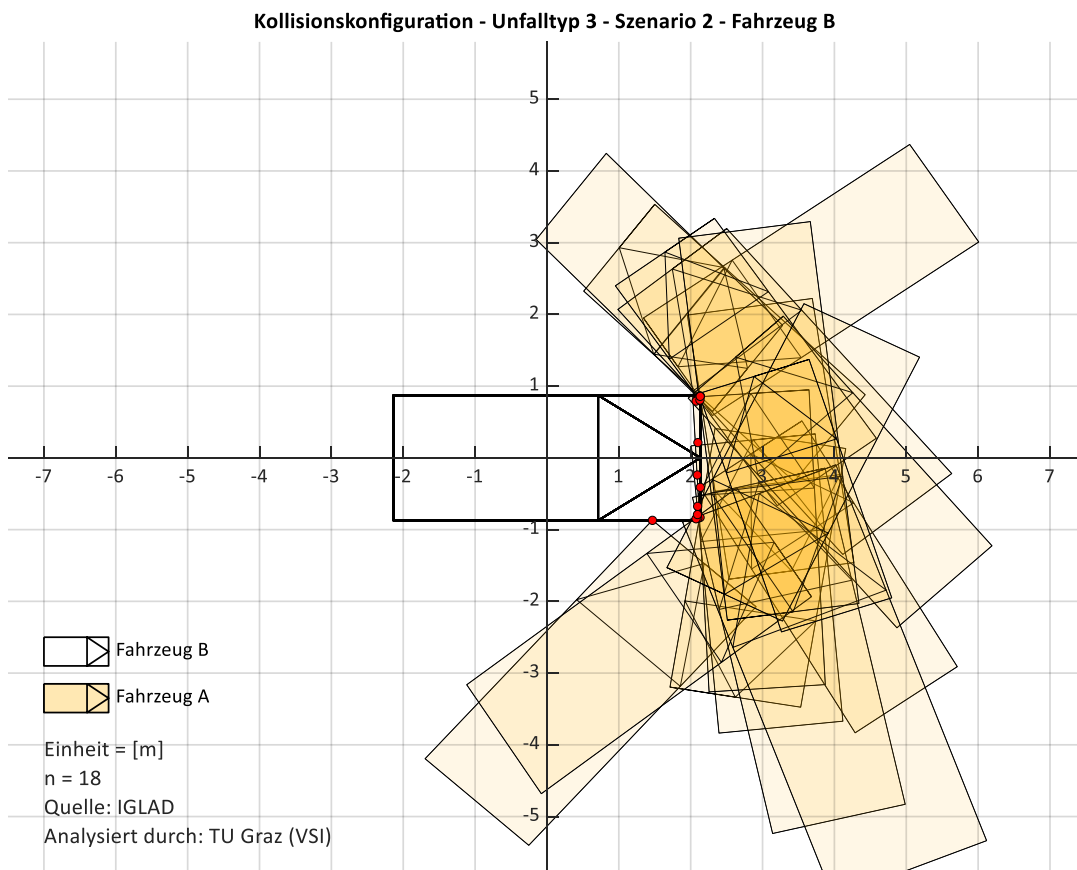


Abbildung 9-104: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 3 - Szenario 2)

Kollisionskonfiguration - Unfalltyp 6 - Szenario 2 - Fahrzeug A

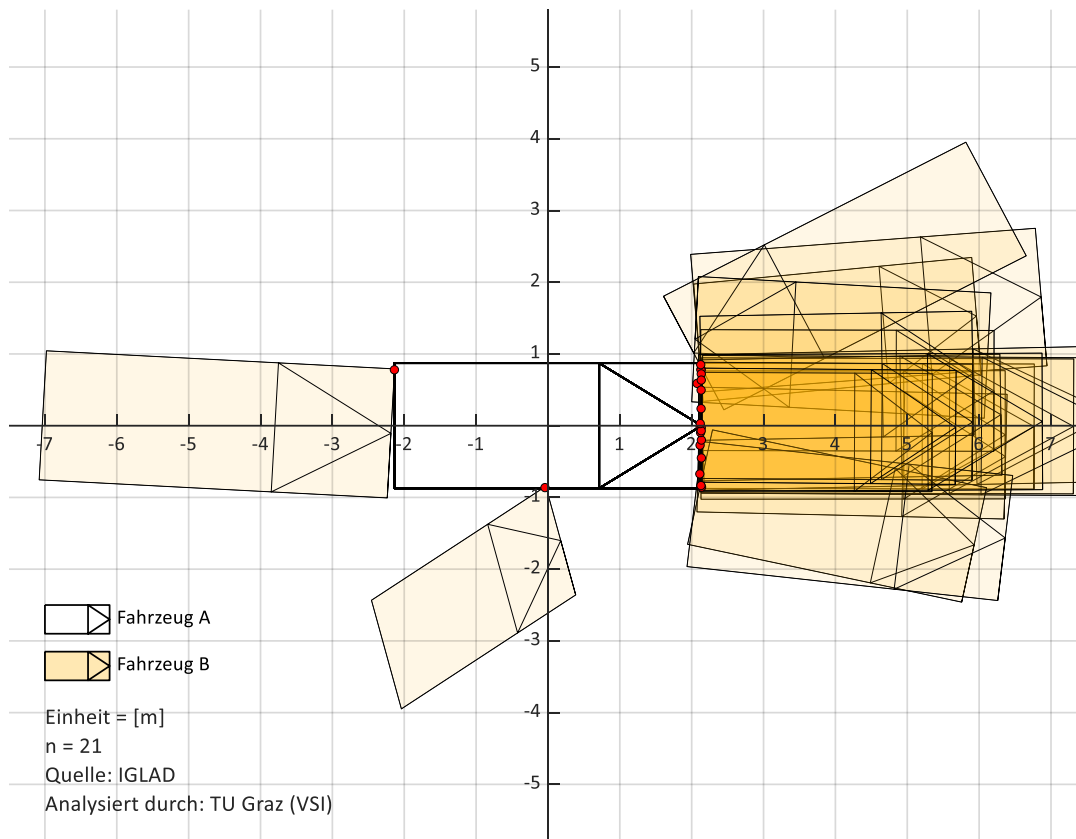


Abbildung 9-105: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 6 - Szenario 2)

Kollisionskonfiguration - Unfalltyp 6 - Szenario 2 - Fahrzeug B

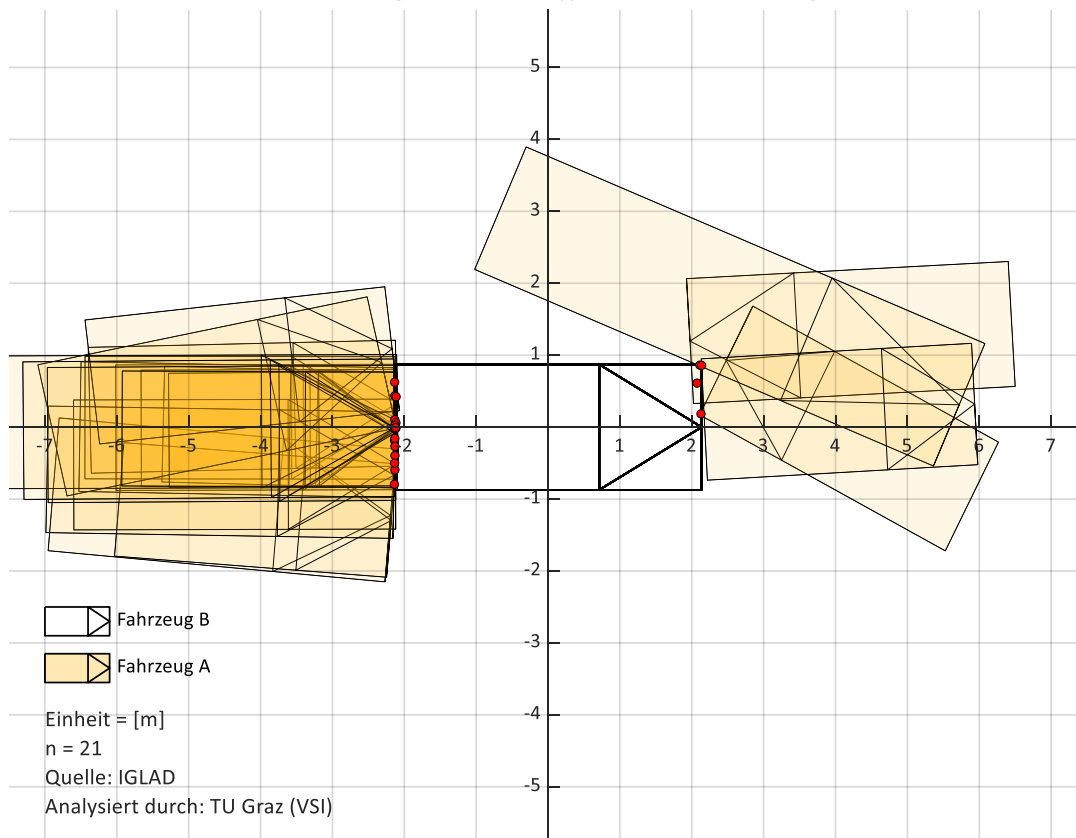


Abbildung 9-106: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 6 - Szenario 2)

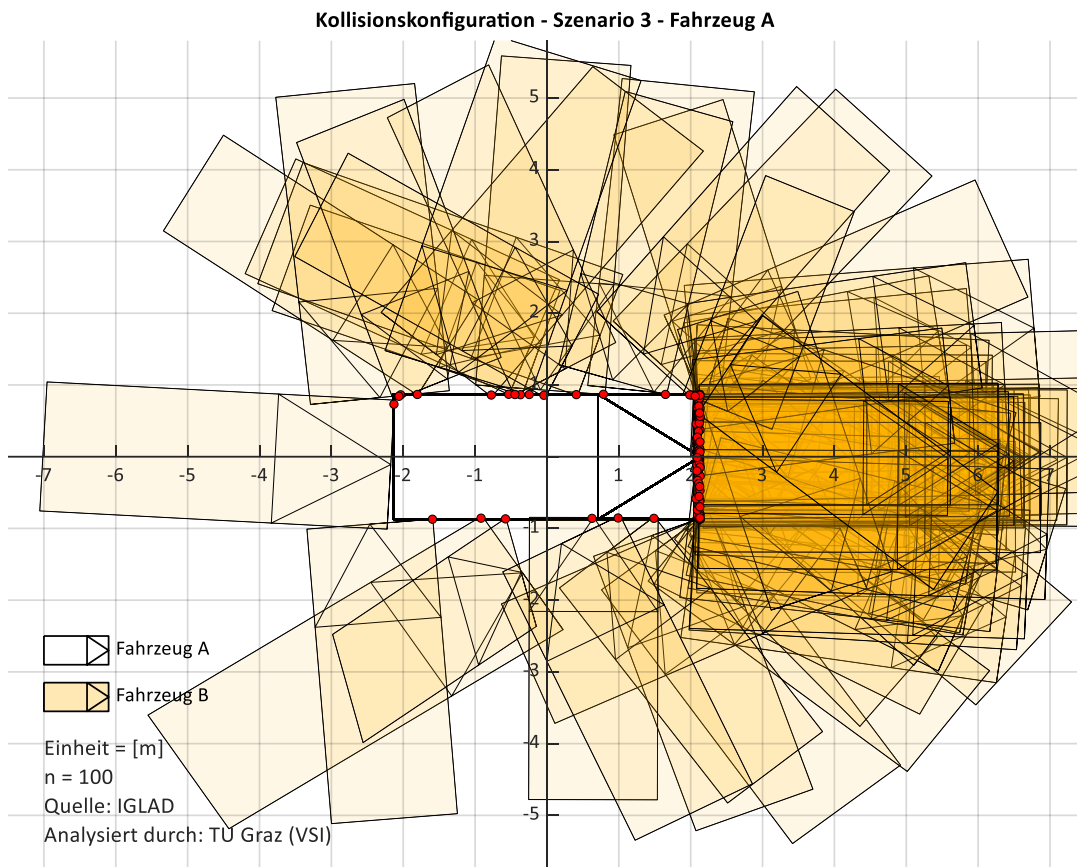


Abbildung 9-107: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Szenario 3)

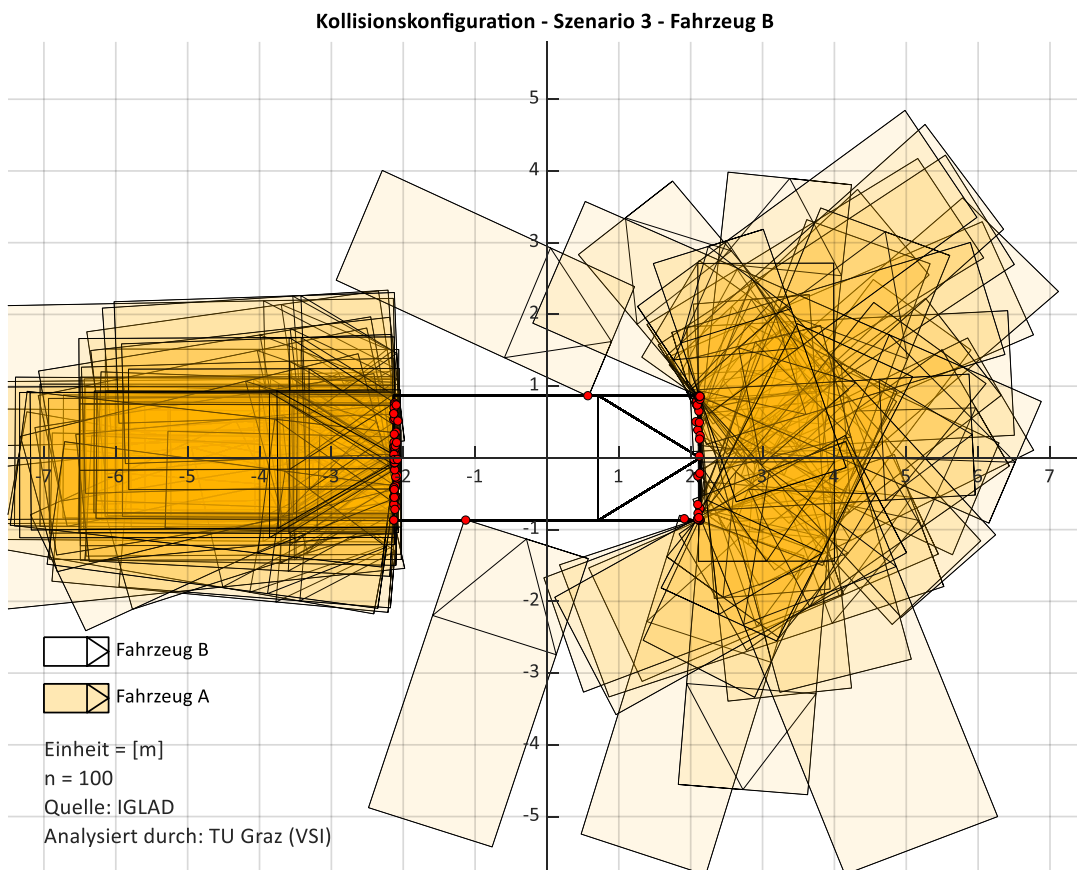


Abbildung 9-108: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Szenario 3)

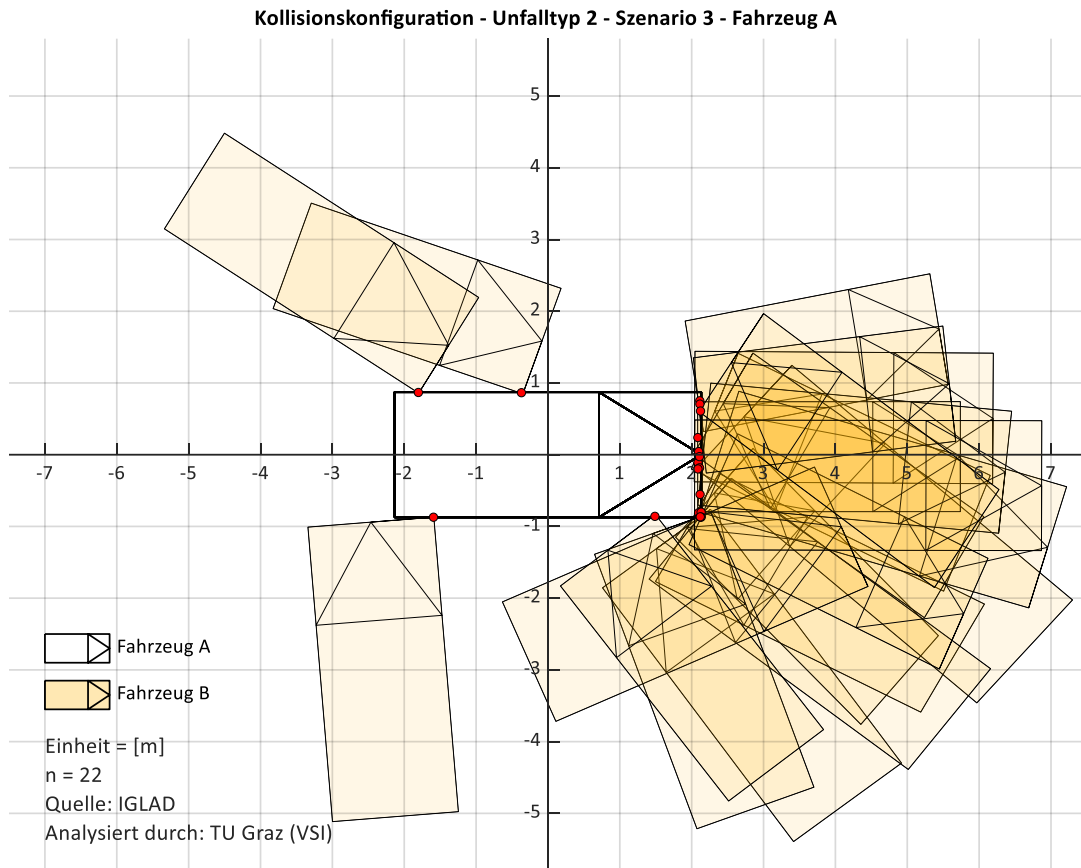


Abbildung 9-109: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 2 - Szenario 3)

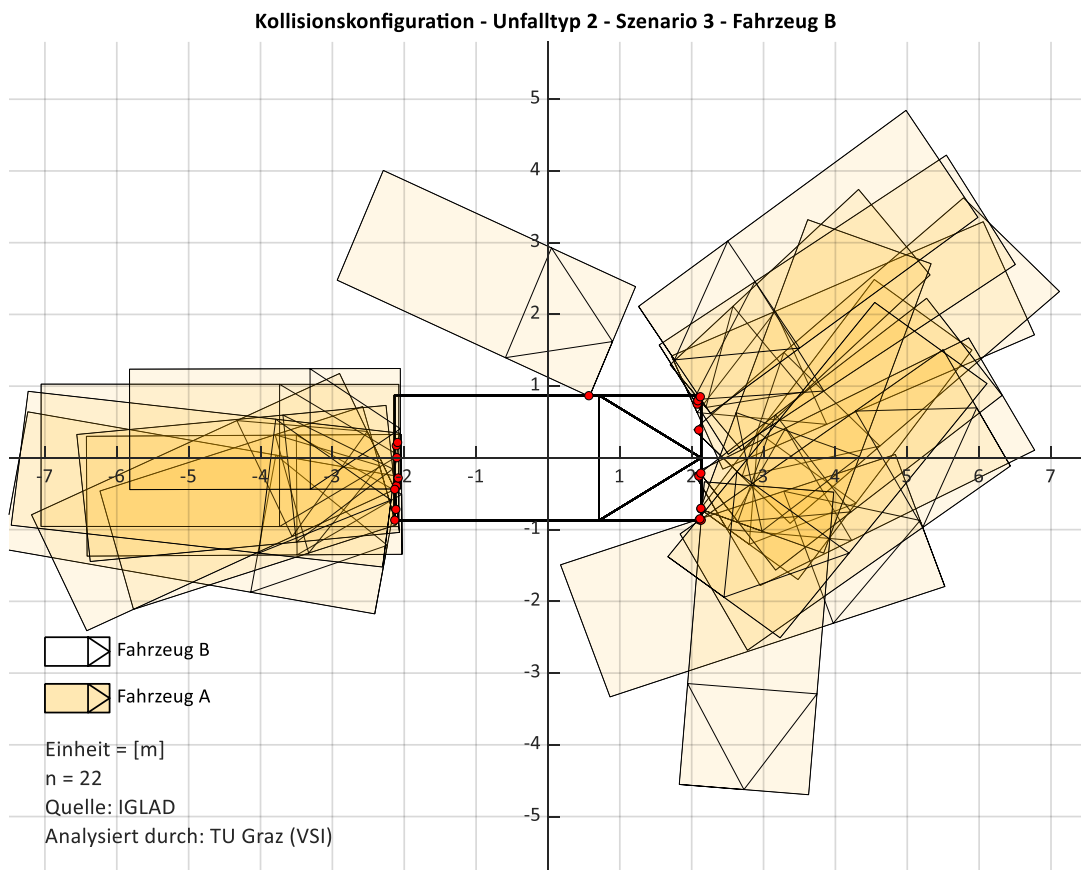


Abbildung 9-110: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 2 - Szenario 3)

Kollisionskonfiguration - Unfalltyp 3 - Szenario 3 - Fahrzeug A

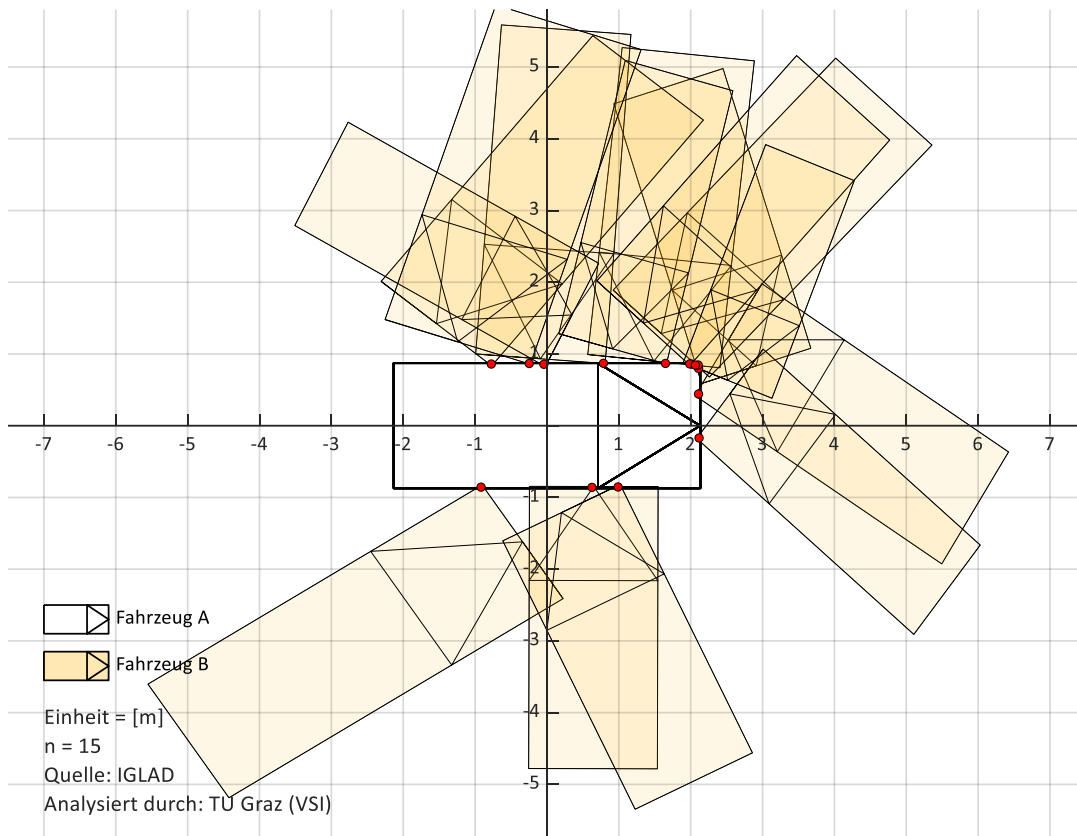


Abbildung 9-111: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 3 - Szenario 3)

Kollisionskonfiguration - Unfalltyp 3 - Szenario 3 - Fahrzeug B

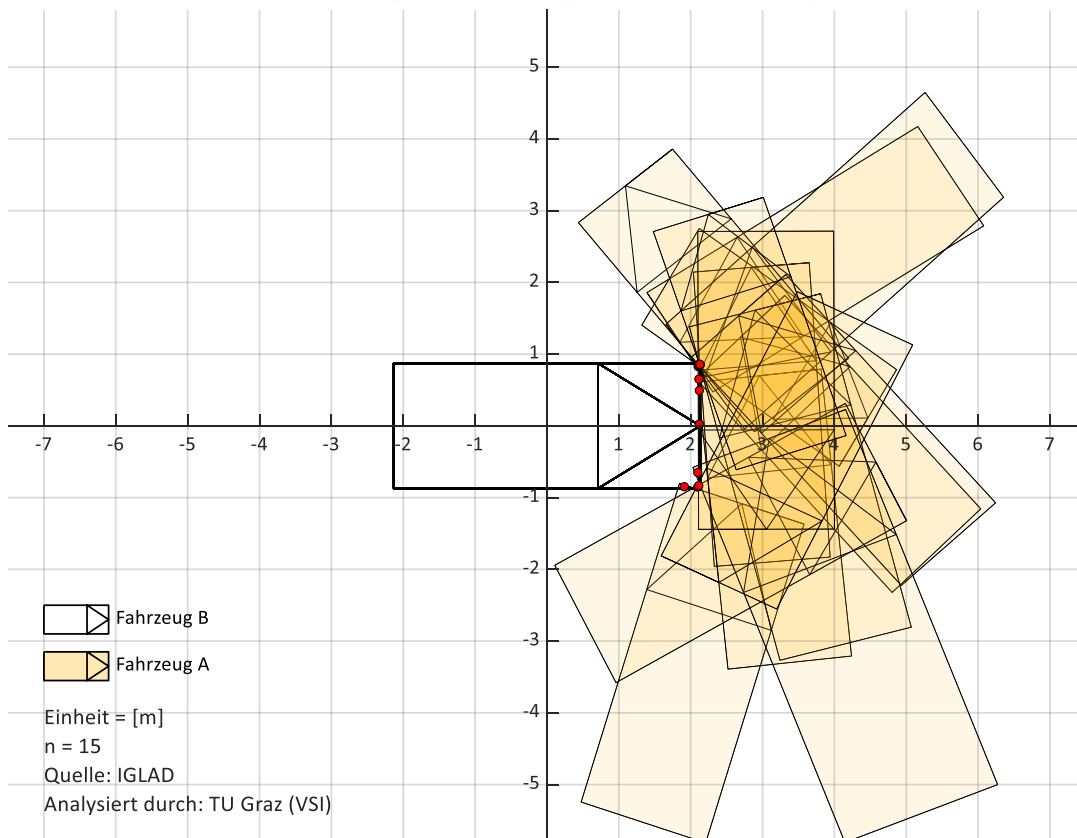


Abbildung 9-112: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 3 - Szenario 3)

Kollisionskonfiguration - Unfalltyp 6 - Szenario 3 - Fahrzeug A

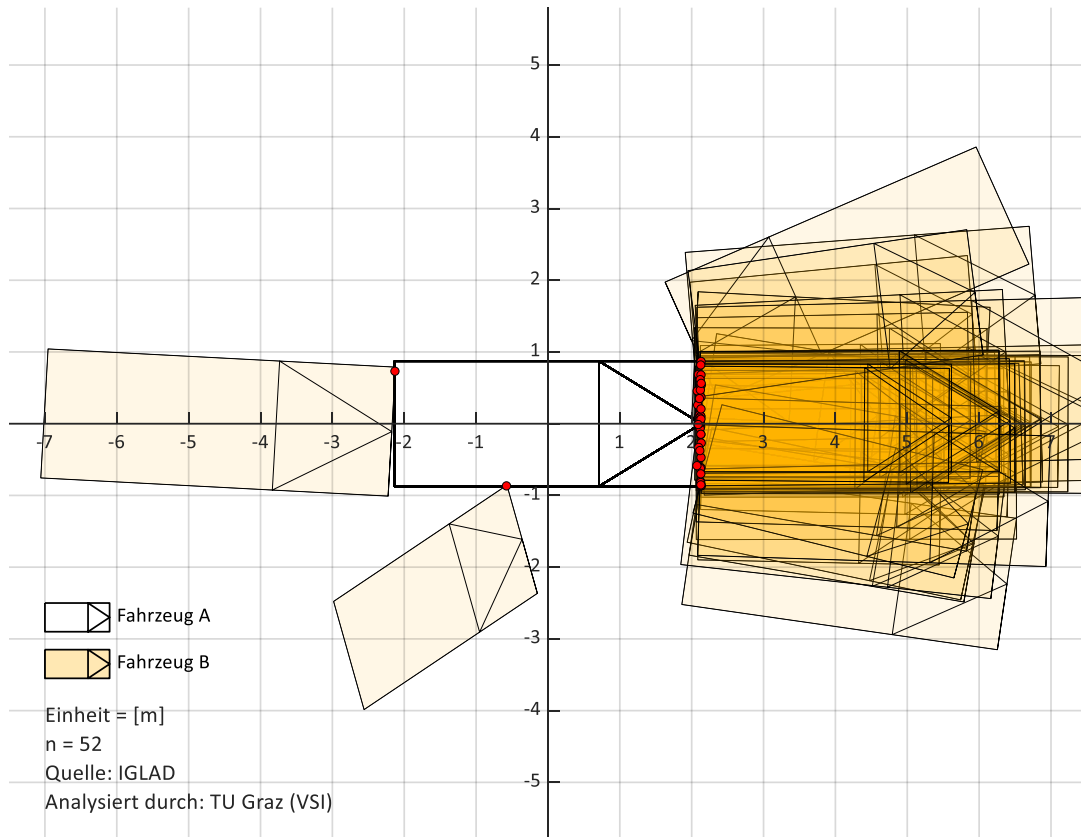


Abbildung 9-113: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 6 - Szenario 3)

Kollisionskonfiguration - Unfalltyp 6 - Szenario 3 - Fahrzeug B

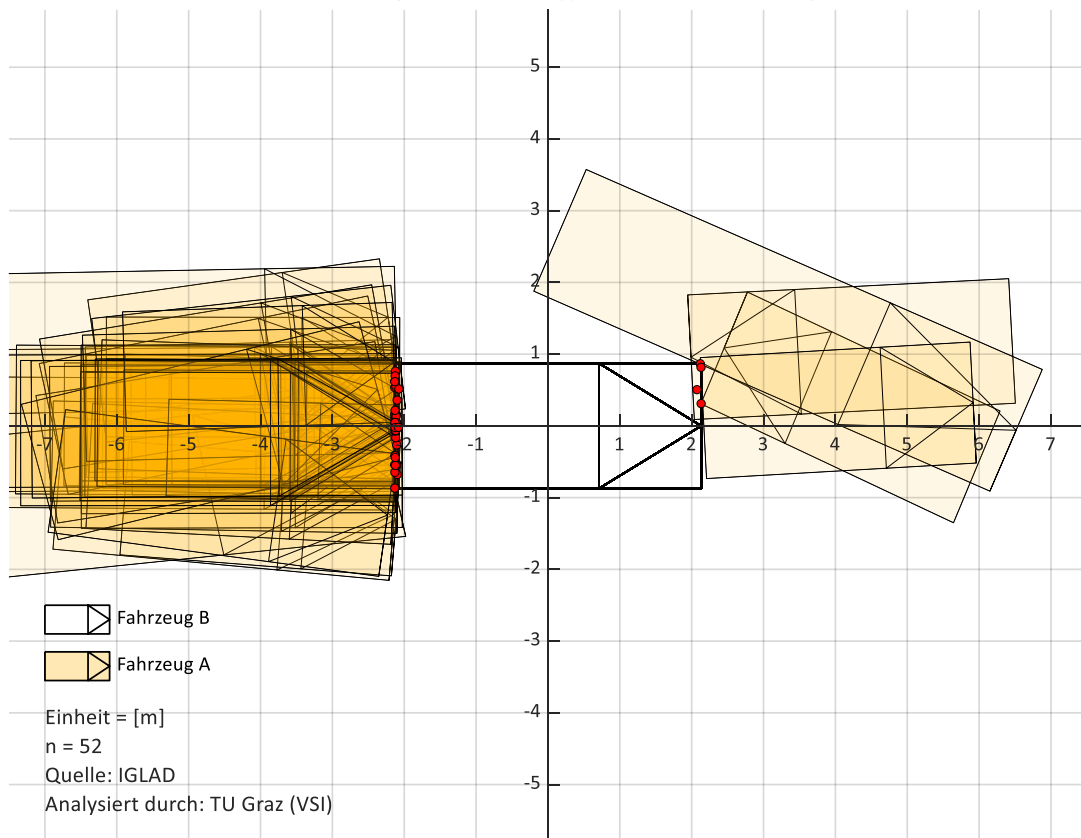


Abbildung 9-114: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 6 - Szenario 3)

Kollisionskonfiguration - Szenario 4 - Fahrzeug A

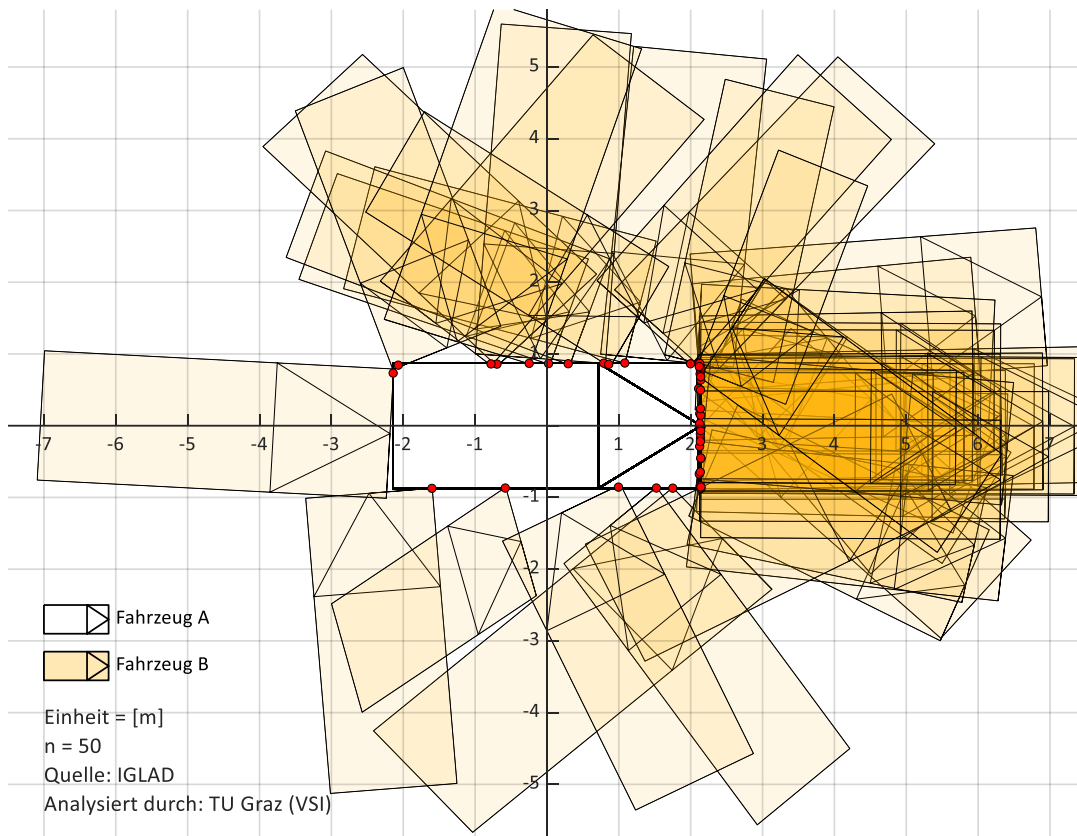


Abbildung 9-115: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Szenario 4)

Kollisionskonfiguration - Szenario 4 - Fahrzeug B

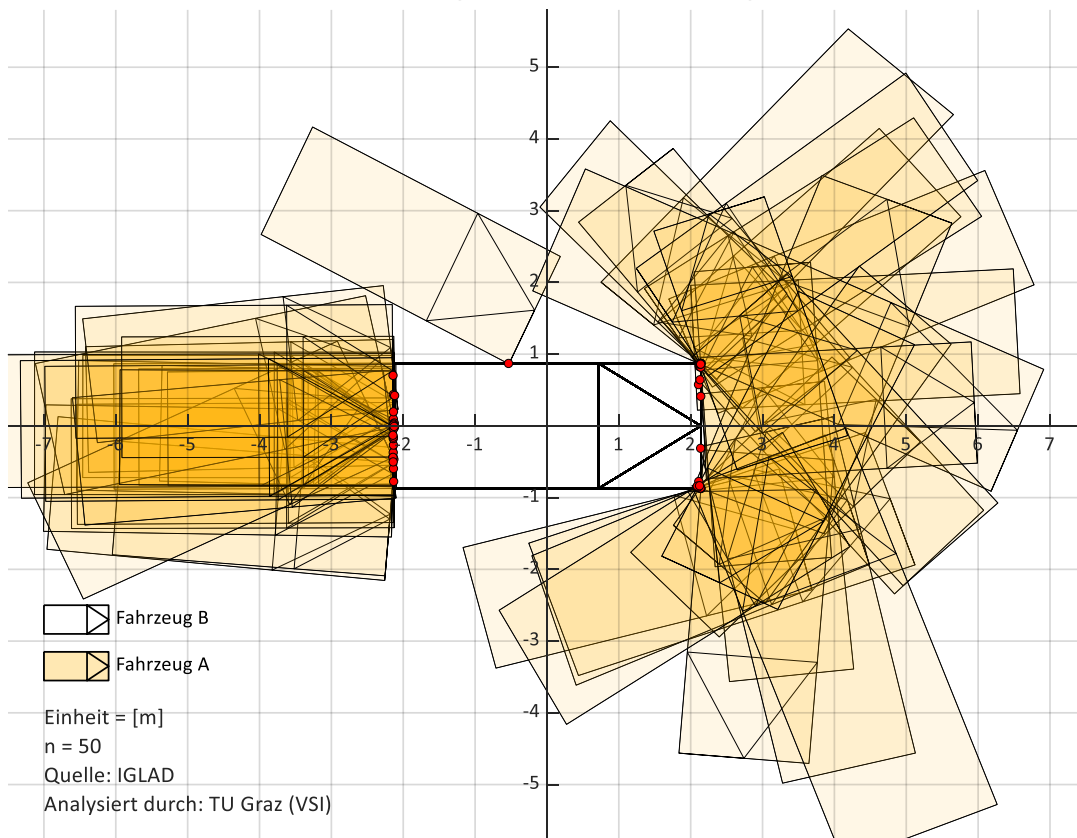


Abbildung 9-116: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Szenario 4)

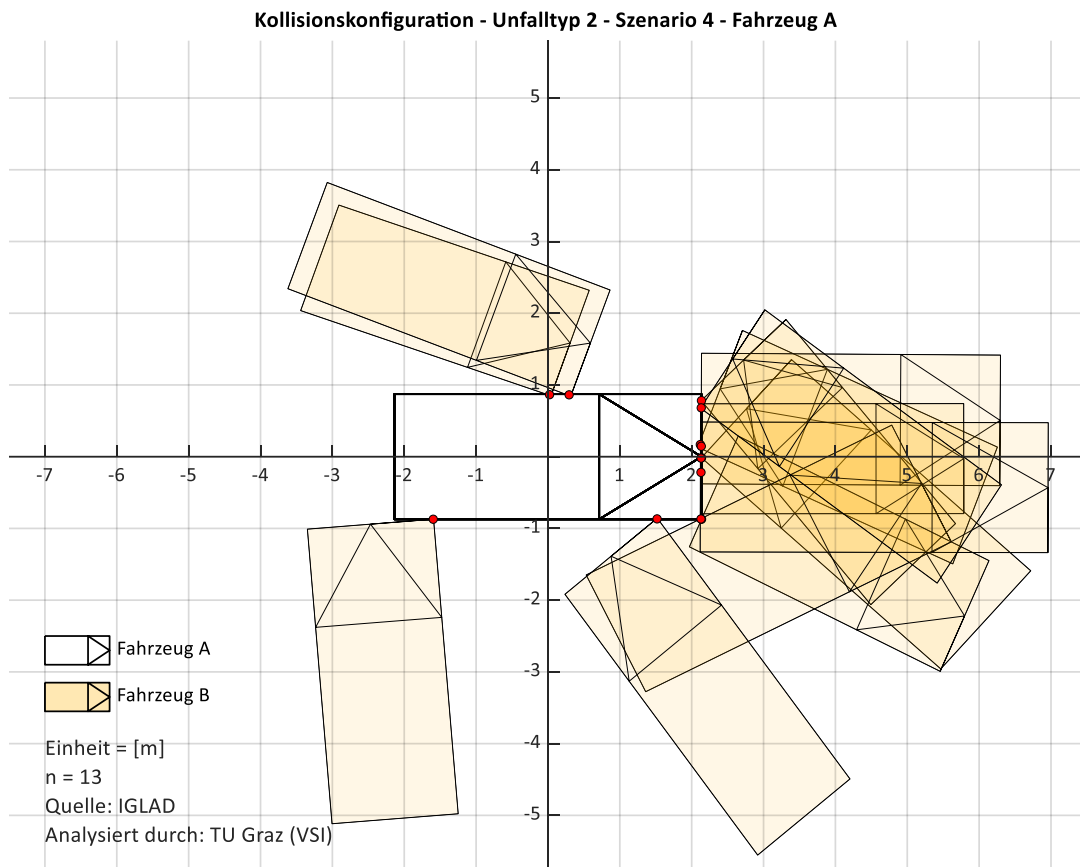


Abbildung 9-117: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 2 - Szenario 4)

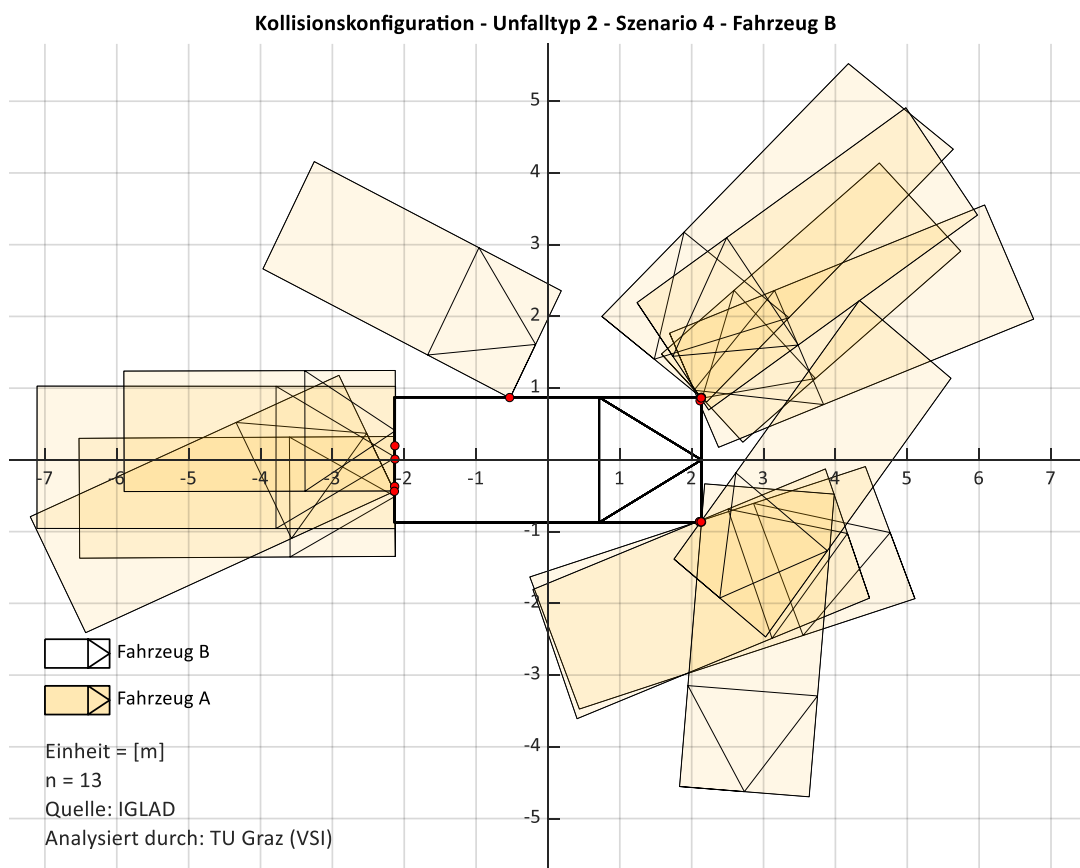


Abbildung 9-118: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 2 - Szenario 4)

Kollisionskonfiguration - Unfalltyp 3 - Szenario 4 - Fahrzeug A

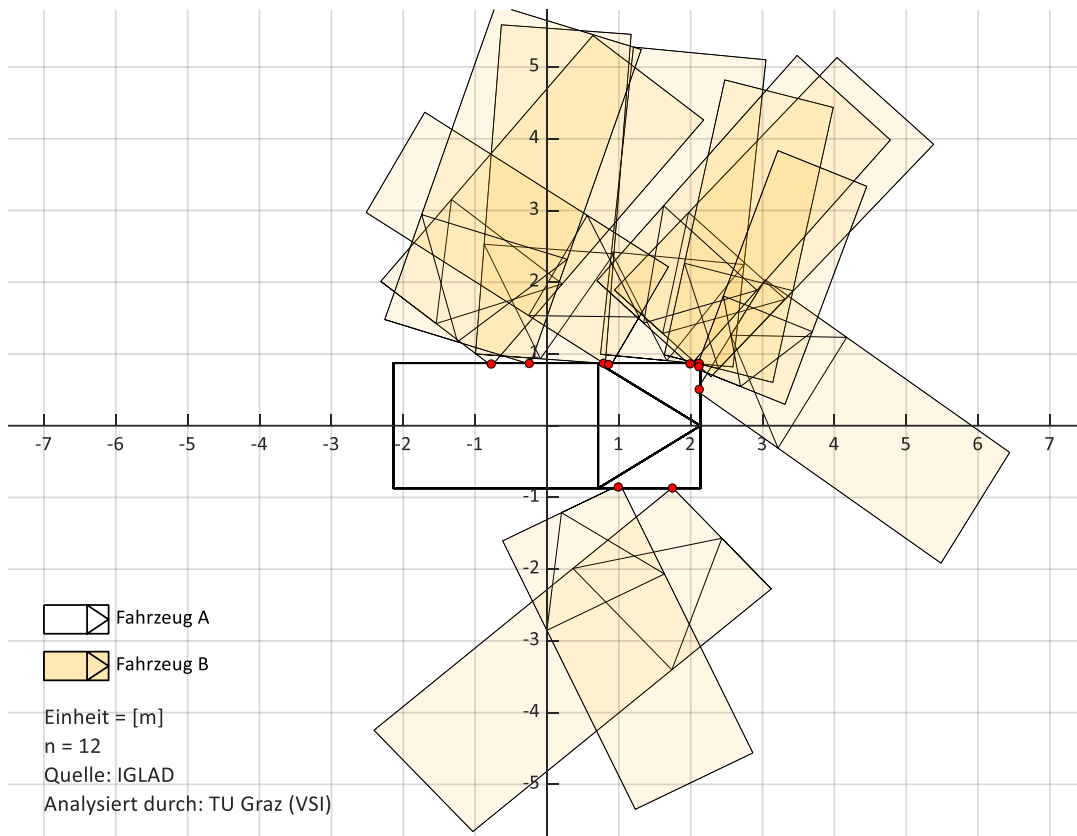


Abbildung 9-119: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 3 - Szenario 4)

Kollisionskonfiguration - Unfalltyp 3 - Szenario 4 - Fahrzeug B

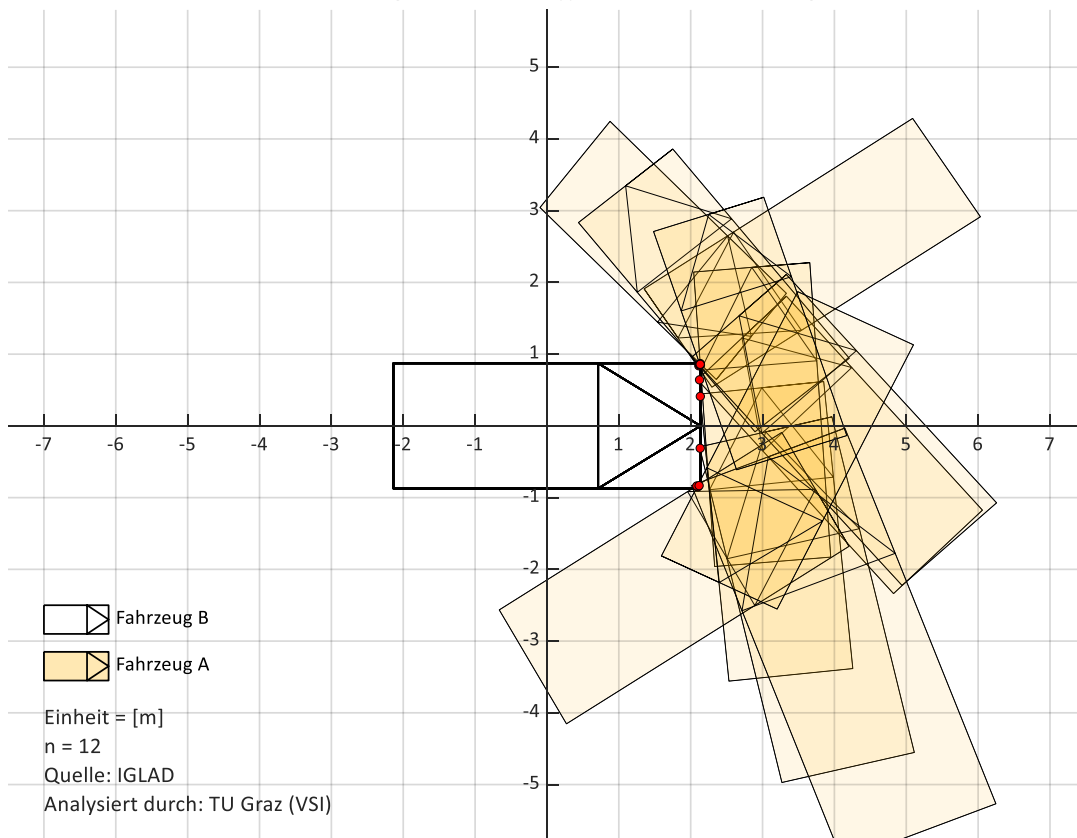


Abbildung 9-120: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 3 - Szenario 4)

Kollisionskonfiguration - Unfalltyp 6 - Szenario 4 - Fahrzeug A

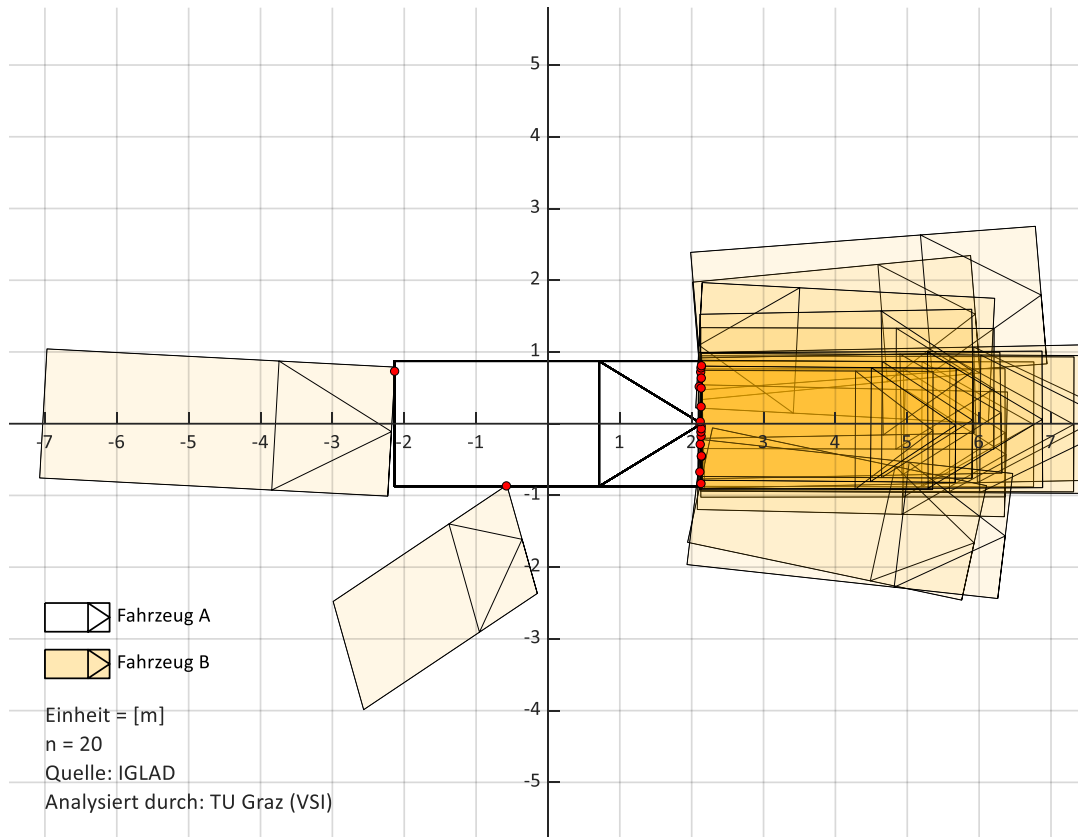


Abbildung 9-121: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs A (Unfalltyp 6 - Szenario 4)

Kollisionskonfiguration - Unfalltyp 6 - Szenario 4 - Fahrzeug B

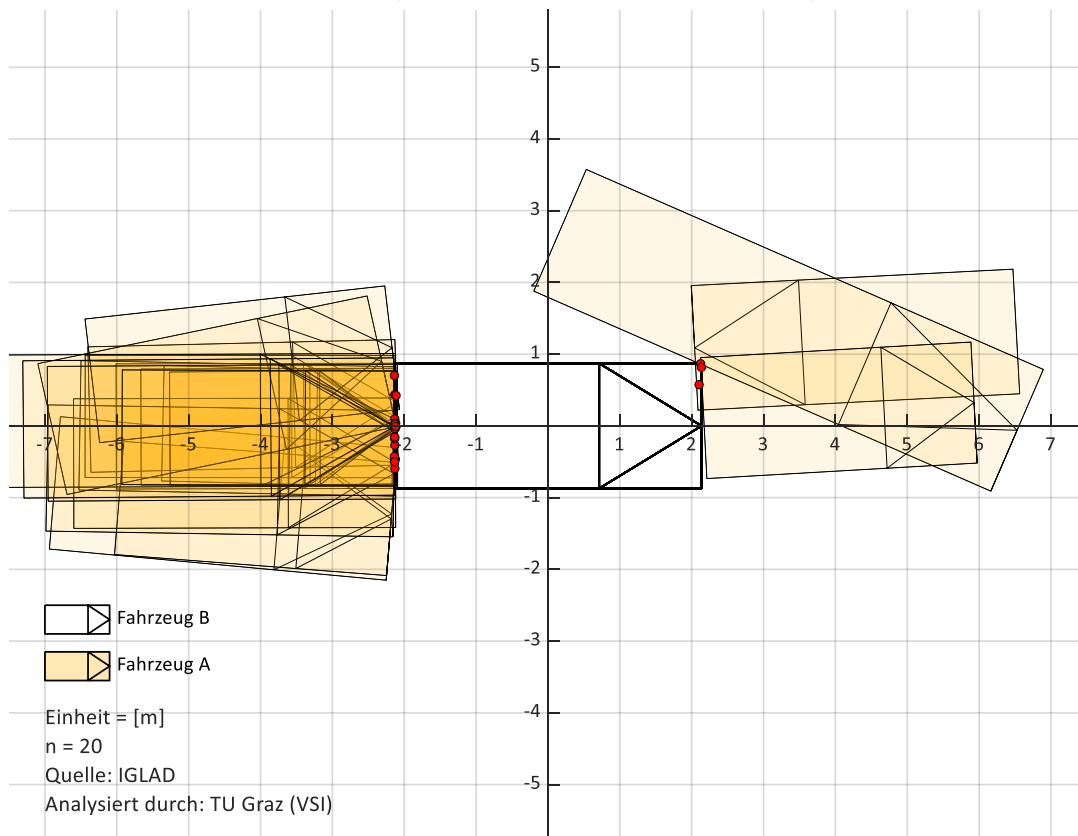


Abbildung 9-122: Kollisionskonfiguration aus Sicht des Fahrzeugs B (Unfalltyp 6 - Szenario 4)

B.4.1 Anzahl der Kollisionen in Abhängigkeit der Fahrzeugseite

Tabelle 9-25: Verteilung des FPOC bei Fahrzeug A und B – Szenario 2

Anzahl der Kollisionen - Szenario 2 - Fahrzeug A			
	A:BL	A:AV	Reduktion
Gesamt []	127	68	46%
Vorderseite []	93	43	54%
Linke Seite []	18	15	17%
Rückseite []	1	1	0%
Rechte Seite []	15	9	40%

Anzahl der Kollisionen - Szenario 2 - Fahrzeug B			
	B:BL	B:CV	Reduktion
Gesamt []	127	68	46%
Vorderseite []	60	41	32%
Linke Seite []	3	1	67%
Rückseite []	60	22	63%
Rechte Seite []	4	4	0%

Anzahl der Kollisionen - Unfalltyp 2 - Szenario 2 - Fahrzeug A			
	A:BL	A:AV	Reduktion
Gesamt []	34	24	29%
Vorderseite []	24	18	25%
Linke Seite []	3	3	0%
Rückseite []	0	0	-
Rechte Seite []	7	3	57%

Anzahl der Kollisionen - Unfalltyp 2 - Szenario 2 - Fahrzeug B			
	B:BL	B:CV	Reduktion
Gesamt []	34	24	29%
Vorderseite []	24	18	25%
Linke Seite []	1	1	0%
Rückseite []	8	4	50%
Rechte Seite []	1	1	0%

Anzahl der Kollisionen - Unfalltyp 3 - Szenario 2 - Fahrzeug A			
	A:BL	A:AV	Reduktion
Gesamt []	28	18	36%
Vorderseite []	12	5	58%
Linke Seite []	9	8	11%
Rückseite []	0	0	-
Rechte Seite []	7	5	29%

Anzahl der Kollisionen - Unfalltyp 3 - Szenario 2 - Fahrzeug B			
	B:BL	B:CV	Reduktion
Gesamt []	28	18	36%
Vorderseite []	25	16	36%
Linke Seite []	1	0	100%
Rückseite []	0	0	-
Rechte Seite []	2	2	0%

Anzahl der Kollisionen - Unfalltyp 6 - Szenario 2 - Fahrzeug A			
	A:BL	A:AV	Reduktion
Gesamt []	52	21	60%
Vorderseite []	50	19	62%
Linke Seite []	0	0	-
Rückseite []	1	1	0%
Rechte Seite []	1	1	0%

Anzahl der Kollisionen - Unfalltyp 6 - Szenario 2 - Fahrzeug B			
	B:BL	B:CV	Reduktion
Gesamt []	52	21	60%
Vorderseite []	4	4	0%
Linke Seite []	0	0	-
Rückseite []	48	17	65%
Rechte Seite []	0	0	-

Tabelle 9-26: Verteilung des FPOC bei Fahrzeug A und B – Szenario 3

Anzahl der Kollisionen - Szenario 3 - Fahrzeug A			
	A:BL	A:CV	Reduktion
Gesamt []	127	100	21%
Vorderseite []	93	79	15%
Linke Seite []	18	14	22%
Rückseite []	1	1	0%
Rechte Seite []	15	6	60%

Anzahl der Kollisionen - Szenario 3 - Fahrzeug B			
	B:BL	B:AV	Reduktion
Gesamt []	127	100	21%
Vorderseite []	60	36	40%
Linke Seite []	3	1	67%
Rückseite []	60	60	0%
Rechte Seite []	4	3	25%

Anzahl der Kollisionen - Unfalltyp 2 - Szenario 3 - Fahrzeug A			
	A:BL	A:CV	Reduktion
Gesamt []	34	22	35%
Vorderseite []	24	18	25%
Linke Seite []	3	2	33%
Rückseite []	0	0	-
Rechte Seite []	7	2	71%

Anzahl der Kollisionen - Unfalltyp 2 - Szenario 3 - Fahrzeug B			
	B:BL	B:AV	Reduktion
Gesamt []	34	22	35%
Vorderseite []	24	12	50%
Linke Seite []	1	1	0%
Rückseite []	8	8	0%
Rechte Seite []	1	1	0%

Anzahl der Kollisionen - Unfalltyp 3 - Szenario 3 - Fahrzeug A			
	A:BL	A:CV	Reduktion
Gesamt []	28	15	46%
Vorderseite []	12	5	58%
Linke Seite []	9	7	22%
Rückseite []	0	0	-
Rechte Seite []	7	3	57%

Anzahl der Kollisionen - Unfalltyp 3 - Szenario 3 - Fahrzeug B			
	B:BL	B:AV	Reduktion
Gesamt []	28	15	46%
Vorderseite []	25	14	44%
Linke Seite []	1	0	100%
Rückseite []	0	0	-
Rechte Seite []	2	1	50%

Anzahl der Kollisionen - Unfalltyp 6 - Szenario 3 - Fahrzeug A			
	A:BL	A:CV	Reduktion
Gesamt []	52	52	0%
Vorderseite []	50	50	0%
Linke Seite []	0	0	-
Rückseite []	1	1	0%
Rechte Seite []	1	1	0%

Anzahl der Kollisionen - Unfalltyp 6 - Szenario 3 - Fahrzeug B			
	B:BL	B:AV	Reduktion
Gesamt []	52	52	0%
Vorderseite []	4	4	0%
Linke Seite []	0	0	-
Rückseite []	48	48	0%
Rechte Seite []	0	0	-

Tabelle 9-27: Verteilung des FPOC bei Fahrzeug A und B – Szenario 4

Anzahl der Kollisionen - Szenario 4 - Fahrzeug A			
	A:BL	A:AV	Reduktion
Gesamt []	127	50	61%
Vorderseite []	93	32	66%
Linke Seite []	18	12	33%
Rückseite []	1	1	0%
Rechte Seite []	15	5	67%

Anzahl der Kollisionen - Szenario 4 - Fahrzeug B			
	B:BL	B:AV	Reduktion
Gesamt []	127	50	61%
Vorderseite []	60	25	58%
Linke Seite []	3	1	67%
Rückseite []	60	23	62%
Rechte Seite []	4	1	75%

Anzahl der Kollisionen - Unfalltyp 2 - Szenario 4 - Fahrzeug A			
	A:BL	A:AV	Reduktion
Gesamt []	34	14	59%
Vorderseite []	24	10	58%
Linke Seite []	3	2	33%
Rückseite []	0	0	-
Rechte Seite []	7	2	71%

Anzahl der Kollisionen - Unfalltyp 2 - Szenario 4 - Fahrzeug B			
	B:BL	B:CV	Reduktion
Gesamt []	34	14	59%
Vorderseite []	24	7	71%
Linke Seite []	1	1	0%
Rückseite []	8	5	38%
Rechte Seite []	1	1	0%

Anzahl der Kollisionen - Unfalltyp 3 - Szenario 4 - Fahrzeug A			
	A:BL	A:AV	Reduktion
Gesamt []	28	12	57%
Vorderseite []	12	3	75%
Linke Seite []	9	7	22%
Rückseite []	0	0	-
Rechte Seite []	7	2	71%

Anzahl der Kollisionen - Unfalltyp 3 - Szenario 4 - Fahrzeug B			
	B:BL	B:CV	Reduktion
Gesamt []	28	12	57%
Vorderseite []	25	12	52%
Linke Seite []	1	0	100%
Rückseite []	0	0	-
Rechte Seite []	2	0	100%

Anzahl der Kollisionen - Unfalltyp 6 - Szenario 4 - Fahrzeug A			
	A:BL	A:AV	Reduktion
Gesamt []	52	20	62%
Vorderseite []	50	18	64%
Linke Seite []	0	0	-
Rückseite []	1	1	0%
Rechte Seite []	1	1	0%

Anzahl der Kollisionen - Unfalltyp 6 - Szenario 4 - Fahrzeug B			
	B:BL	B:CV	Reduktion
Gesamt []	52	20	62%
Vorderseite []	4	3	25%
Linke Seite []	0	0	-
Rückseite []	48	17	65%
Rechte Seite []	0	0	-

B.4.2 Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur

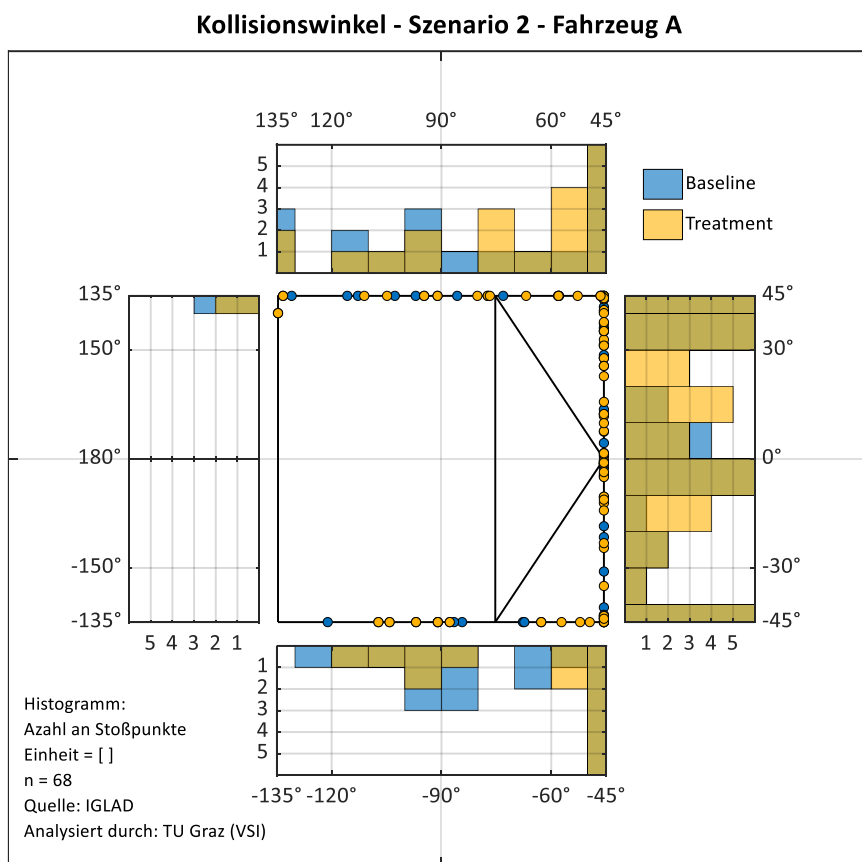


Abbildung 9-123: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Szenario 2 – Fahrzeug A

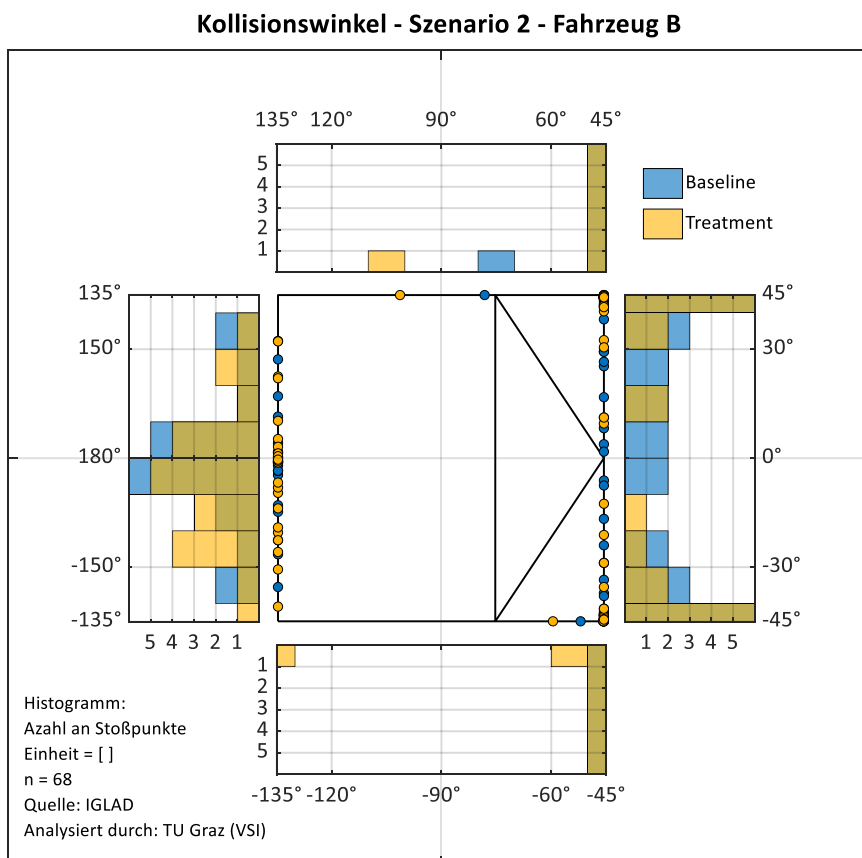


Abbildung 9-124: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Szenario 2 – Fahrzeug B

Kollisionswinkel - Unfalltyp 2 - Szenario 2 - Fahrzeug A

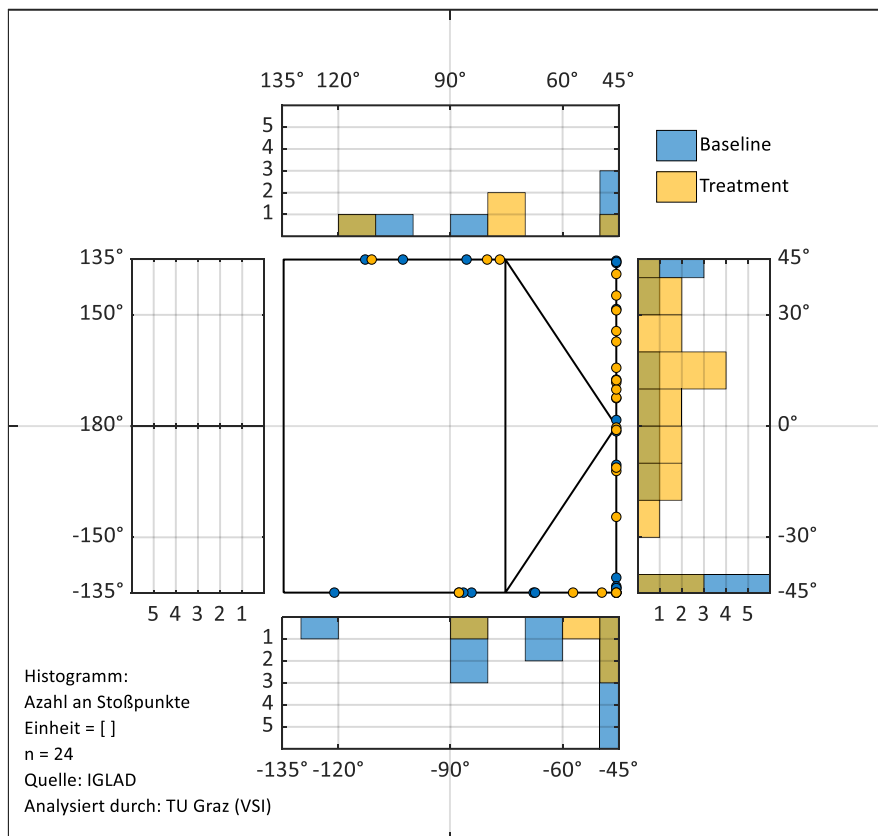


Abbildung 9-125: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 2 – Szenario 2 – Fahrzeug A

Kollisionswinkel - Unfalltyp 2 - Szenario 2 - Fahrzeug B

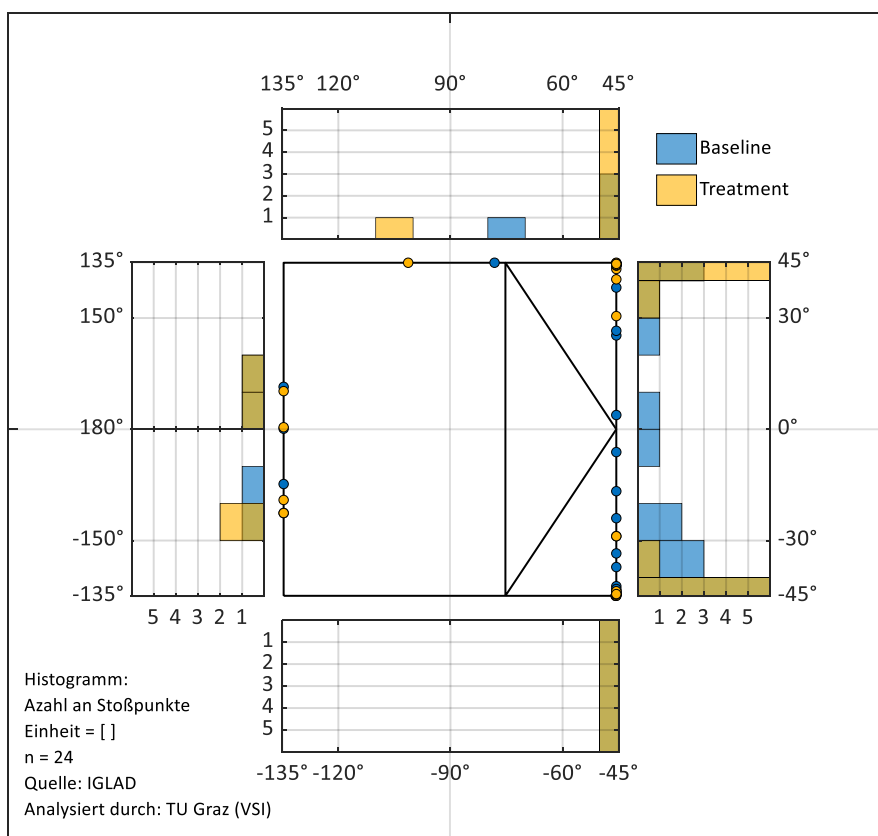


Abbildung 9-126: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 2 – Szenario 2 – Fahrzeug B

Kollisionswinkel - Unfalltyp 3 - Szenario 2 - Fahrzeug A

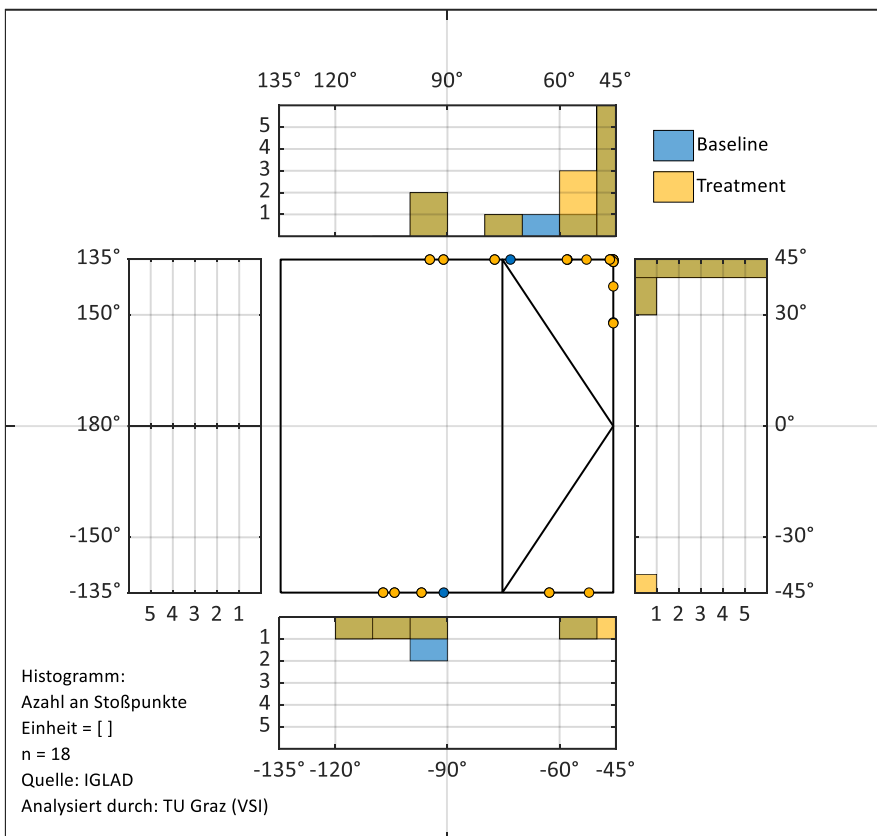


Abbildung 9-127: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 3 – Szenario 2 – Fahrzeug A

Kollisionswinkel - Unfalltyp 3 - Szenario 2 - Fahrzeug B

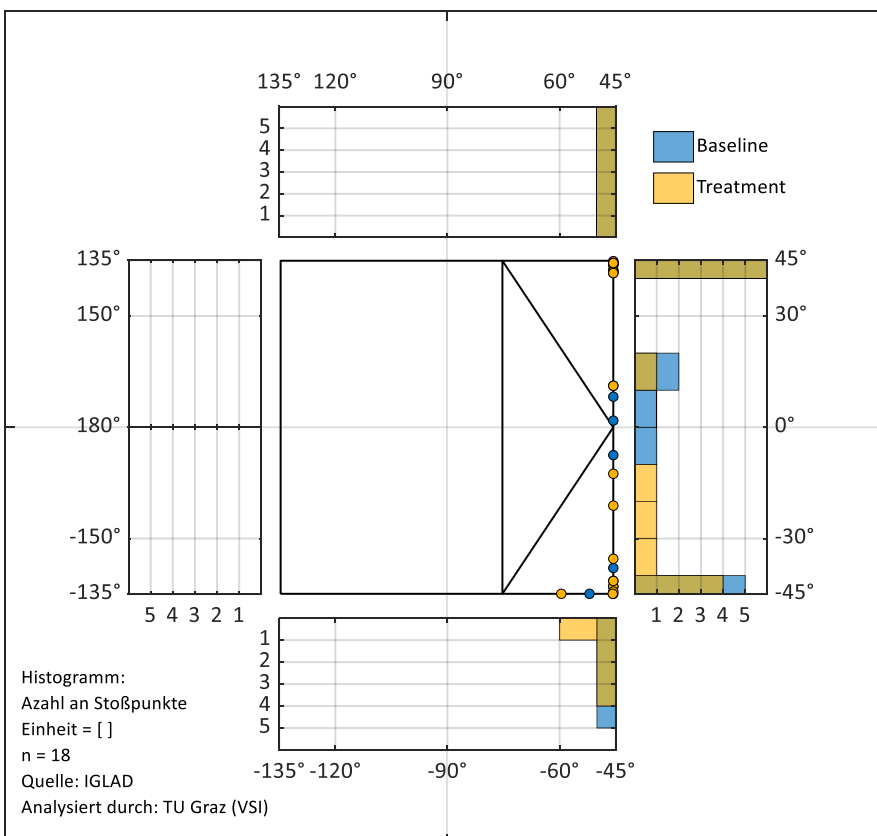


Abbildung 9-128: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 3 – Szenario 2 – Fahrzeug B

Kollisionswinkel - Unfalltyp 6 - Szenario 2 - Fahrzeug A

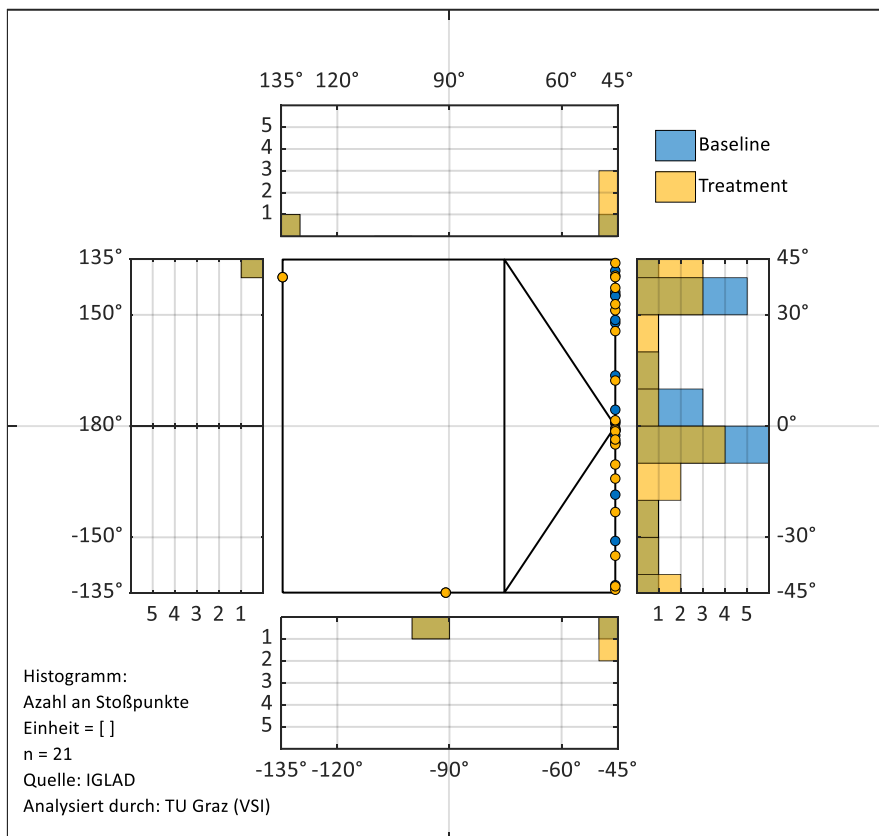


Abbildung 9-129: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 6 – Szenario 2 – Fahrzeug A

Kollisionswinkel - Unfalltyp 6 - Szenario 2 - Fahrzeug B

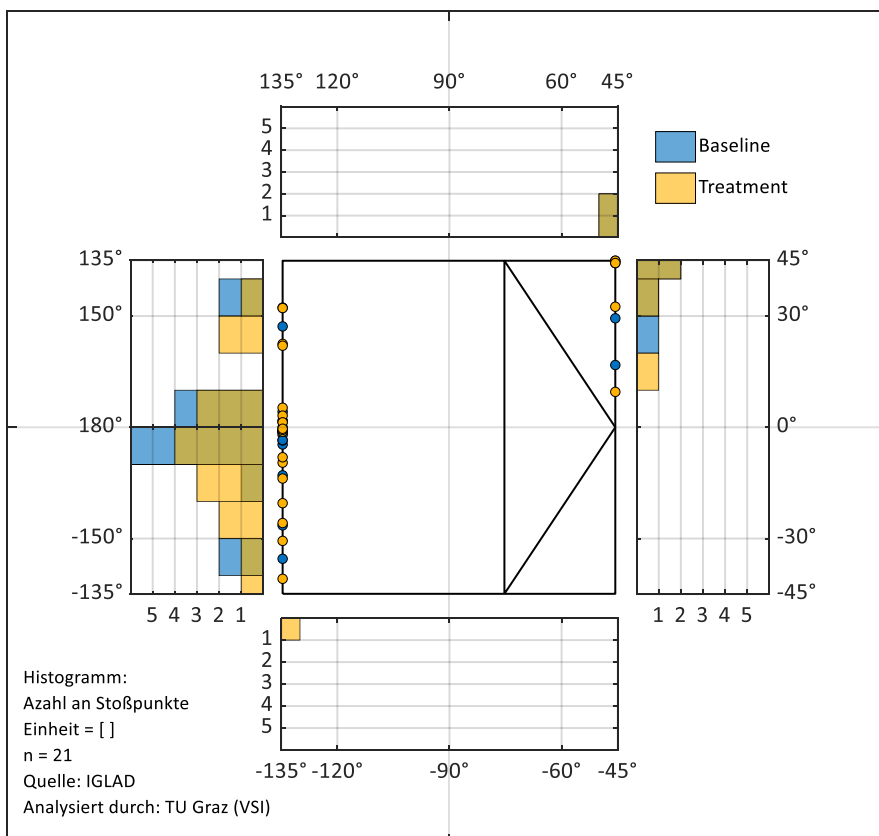


Abbildung 9-130: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 6 – Szenario 2 – Fahrzeug B

Kollisionswinkel - Szenario 3 - Fahrzeug A

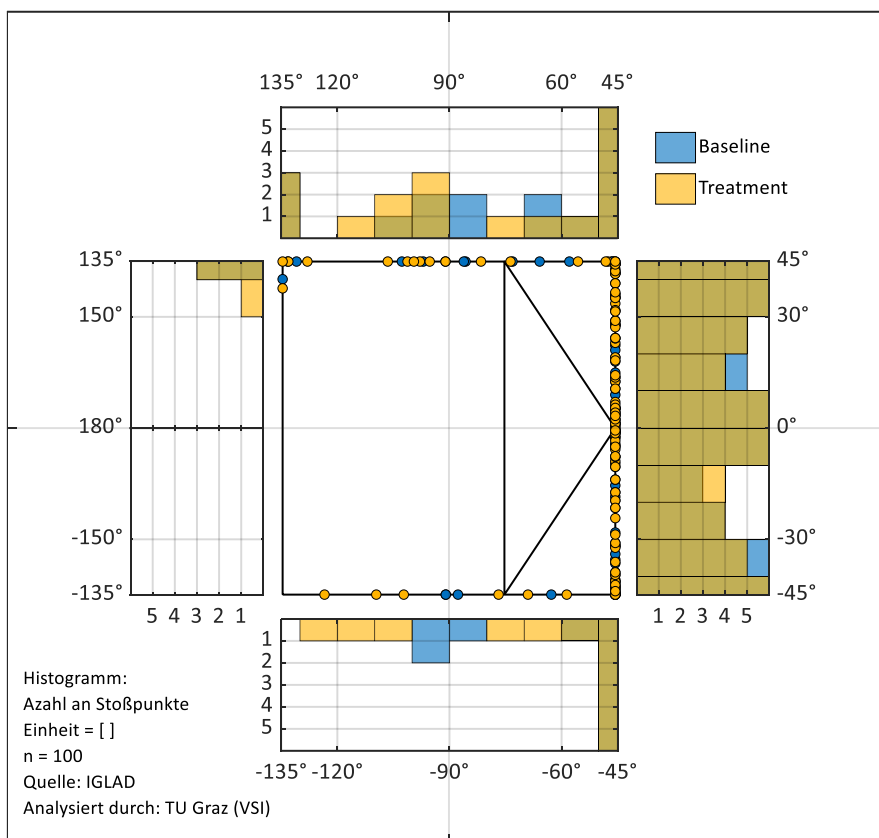


Abbildung 9-131: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Szenario 3 – Fahrzeug A

Kollisionswinkel - Szenario 3 - Fahrzeug B

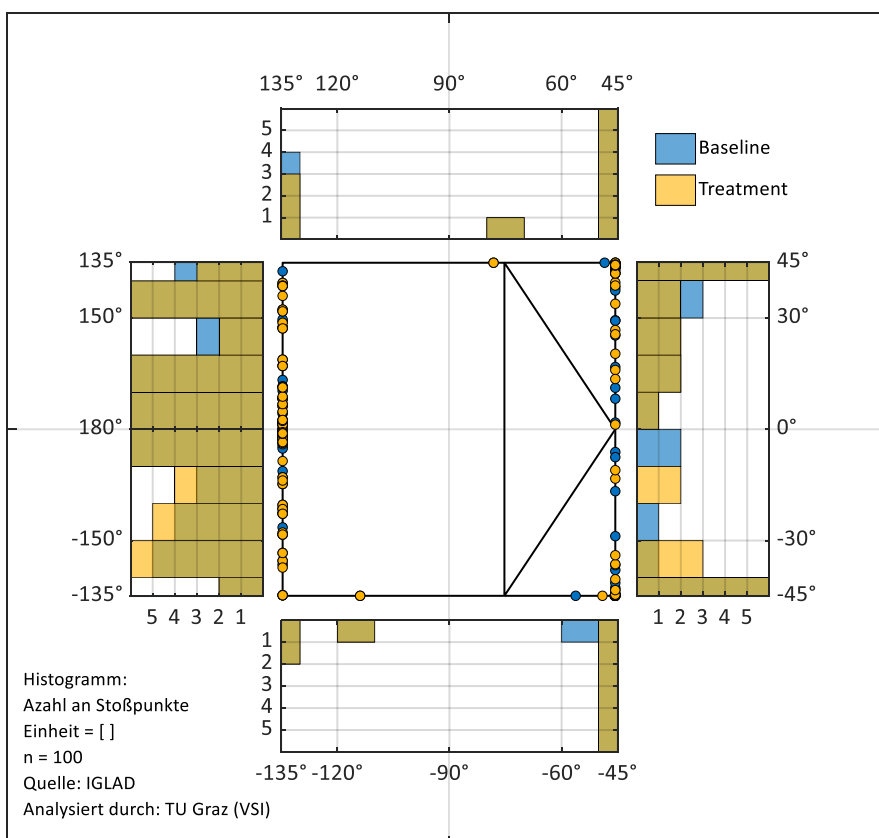


Abbildung 9-132: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Szenario 3 – Fahrzeug B

Kollisionswinkel - Unfalltyp 2 - Szenario 3 - Fahrzeug A

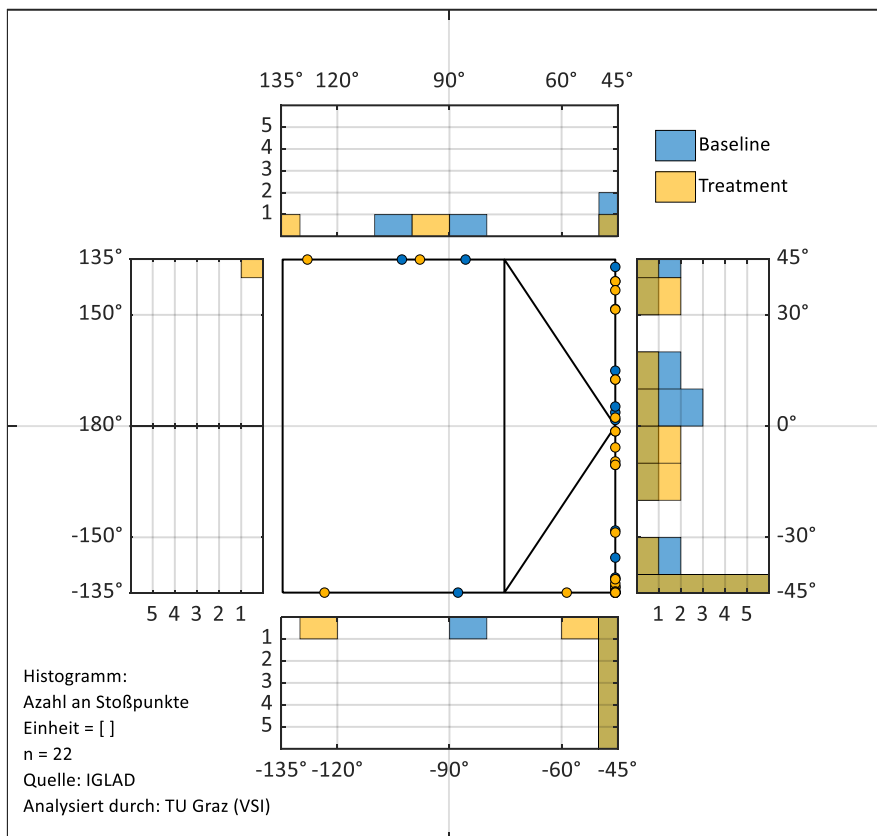


Abbildung 9-133: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 2 – Szenario 3 – Fahrzeug A

Kollisionswinkel - Unfalltyp 2 - Szenario 3 - Fahrzeug B

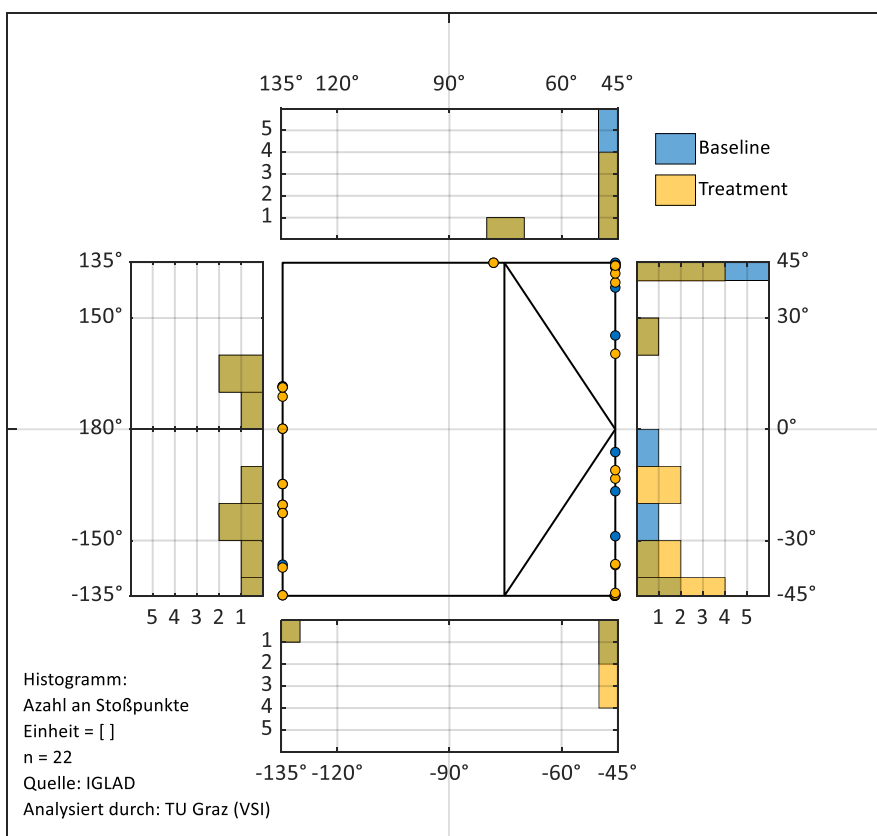


Abbildung 9-134: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 2 – Szenario 3 – Fahrzeug B

Kollisionswinkel - Unfalltyp 3 - Szenario 3 - Fahrzeug A

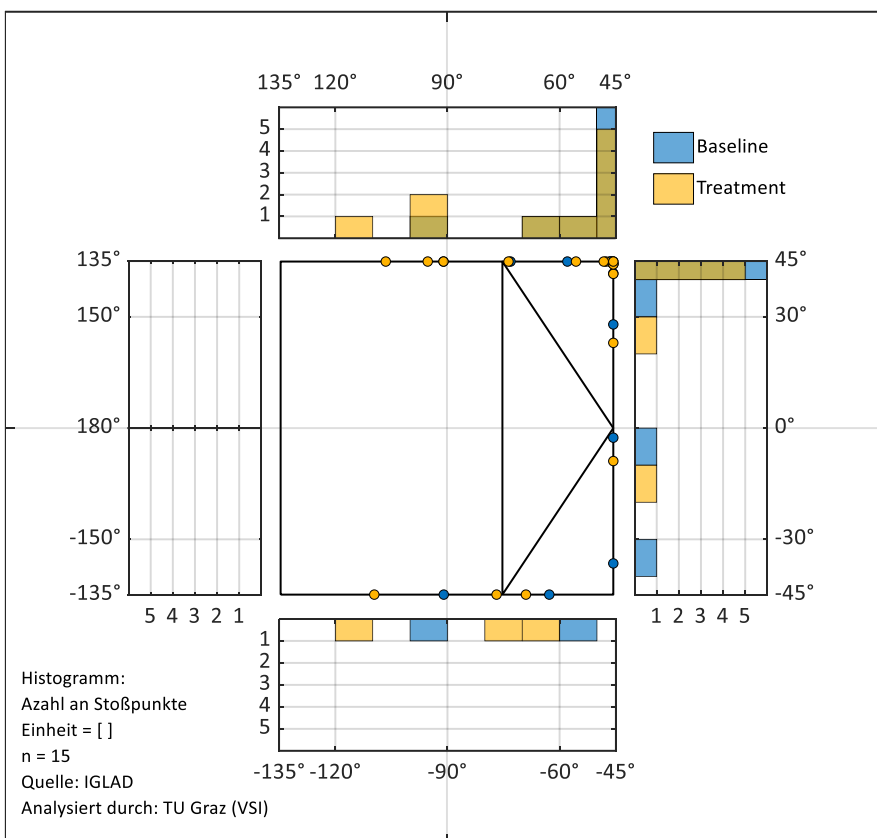


Abbildung 9-135: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 3 – Szenario 3 – Fahrzeug A

Kollisionswinkel - Unfalltyp 3 - Szenario 3 - Fahrzeug B

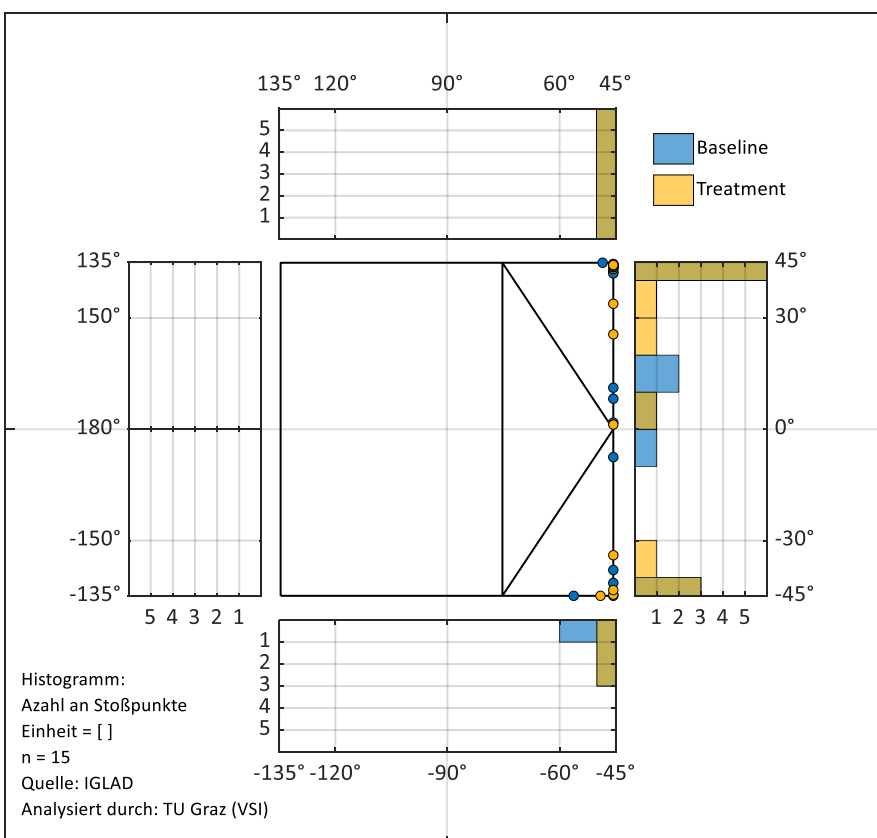


Abbildung 9-136: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 3 – Szenario 3 – Fahrzeug B

Kollisionswinkel - Unfalltyp 6 - Szenario 3 - Fahrzeug A

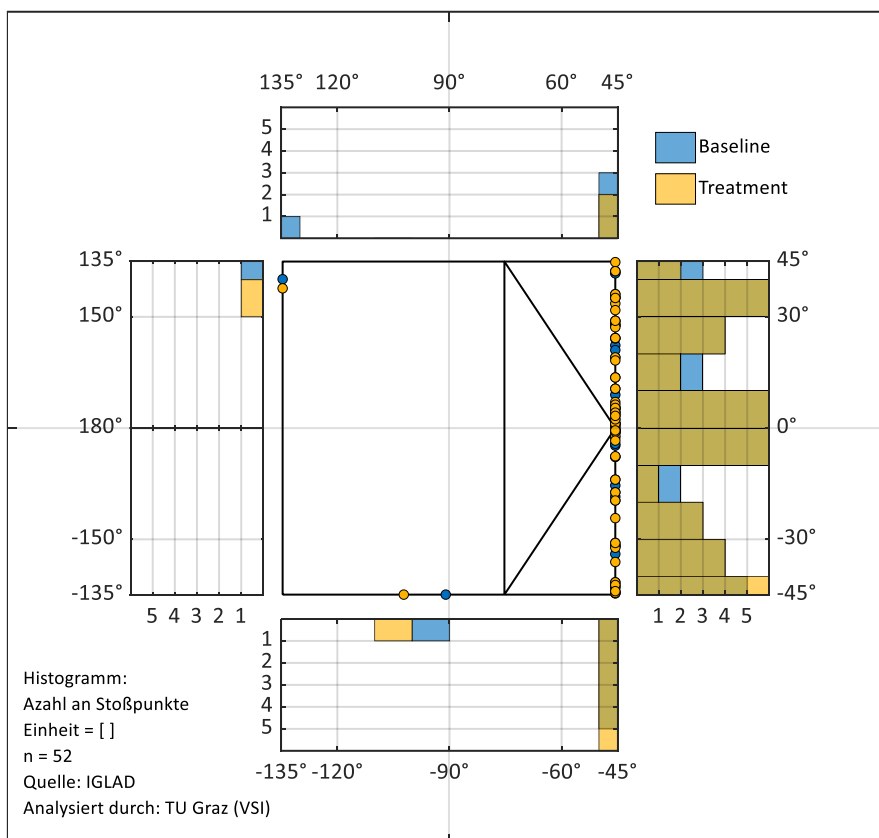


Abbildung 9-137: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 6 – Szenario 3 – Fahrzeug A

Kollisionswinkel - Unfalltyp 6 - Szenario 3 - Fahrzeug B

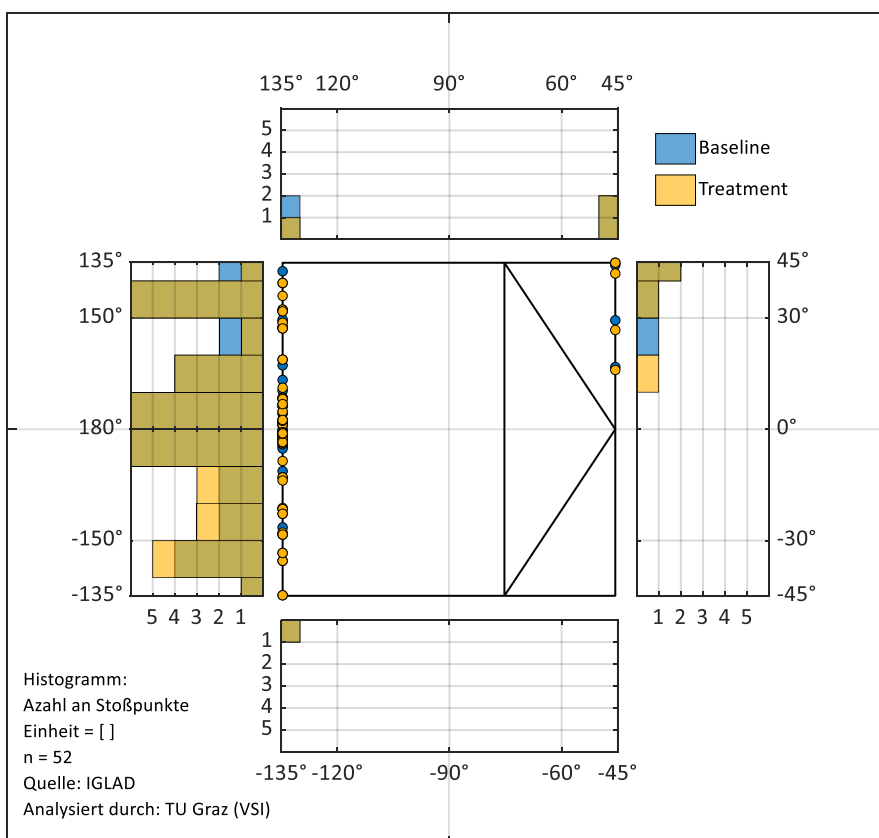


Abbildung 9-138: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 6 – Szenario 3 – Fahrzeug B

Kollisionswinkel - Szenario 4 - Fahrzeug A

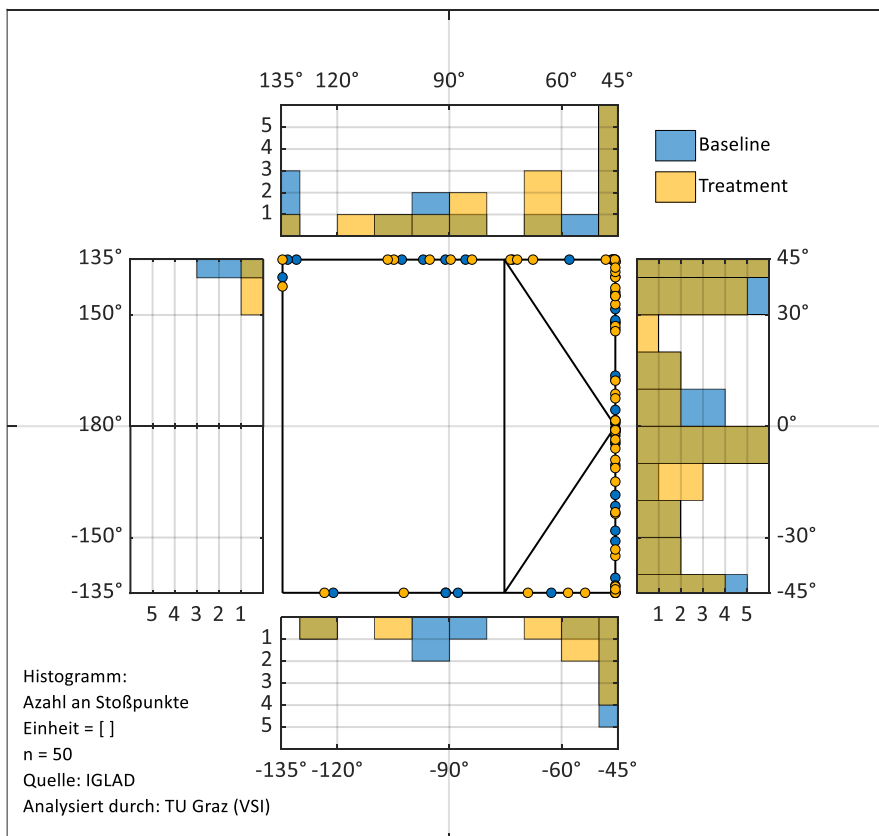


Abbildung 9-139: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Szenario 4 – Fahrzeug A

Kollisionswinkel - Szenario 4 - Fahrzeug B

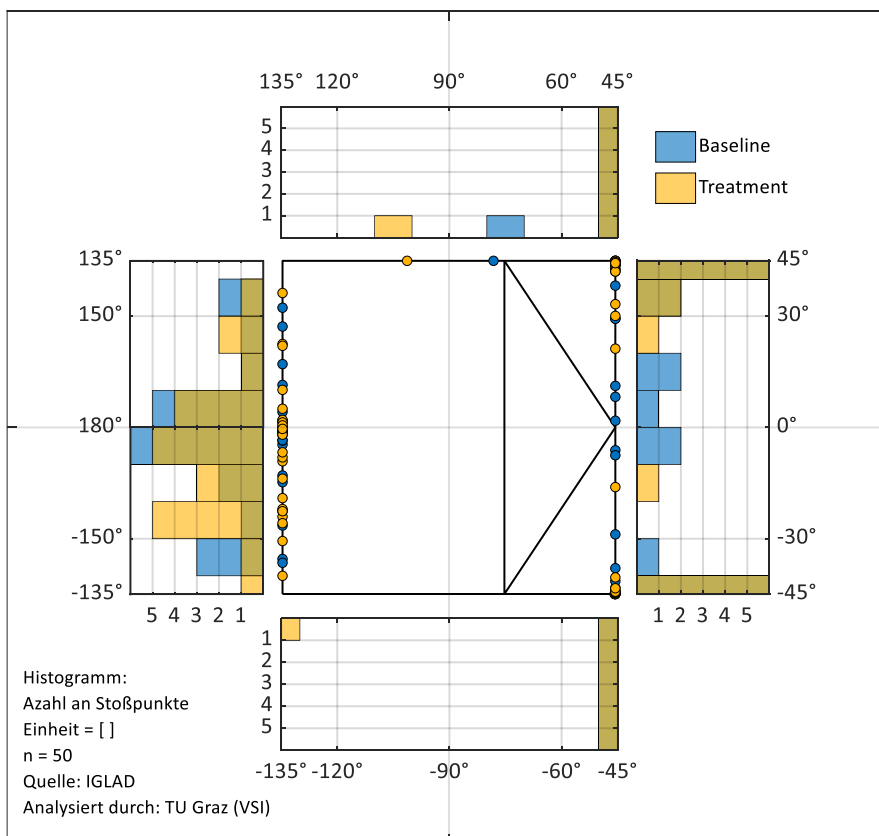


Abbildung 9-140: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Szenario 4 – Fahrzeug B

Kollisionswinkel - Unfalltyp 2 - Szenario 4 - Fahrzeug A

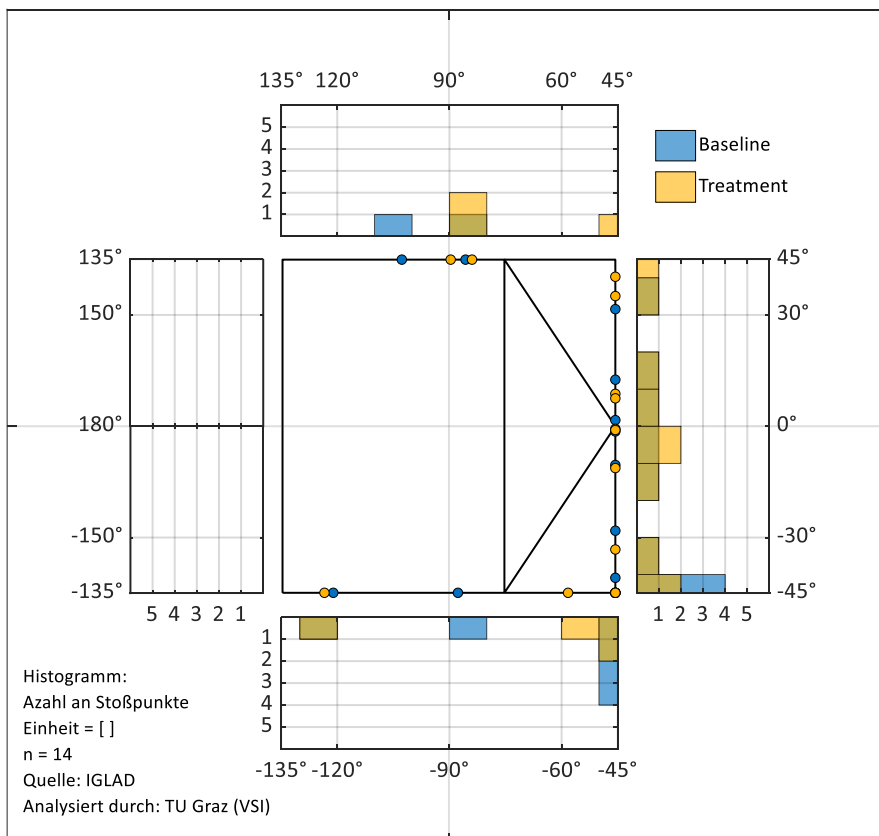


Abbildung 9-141: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 2 – Szenario 4 – Fahrzeug A

Kollisionswinkel - Unfalltyp 2 - Szenario 4 - Fahrzeug B

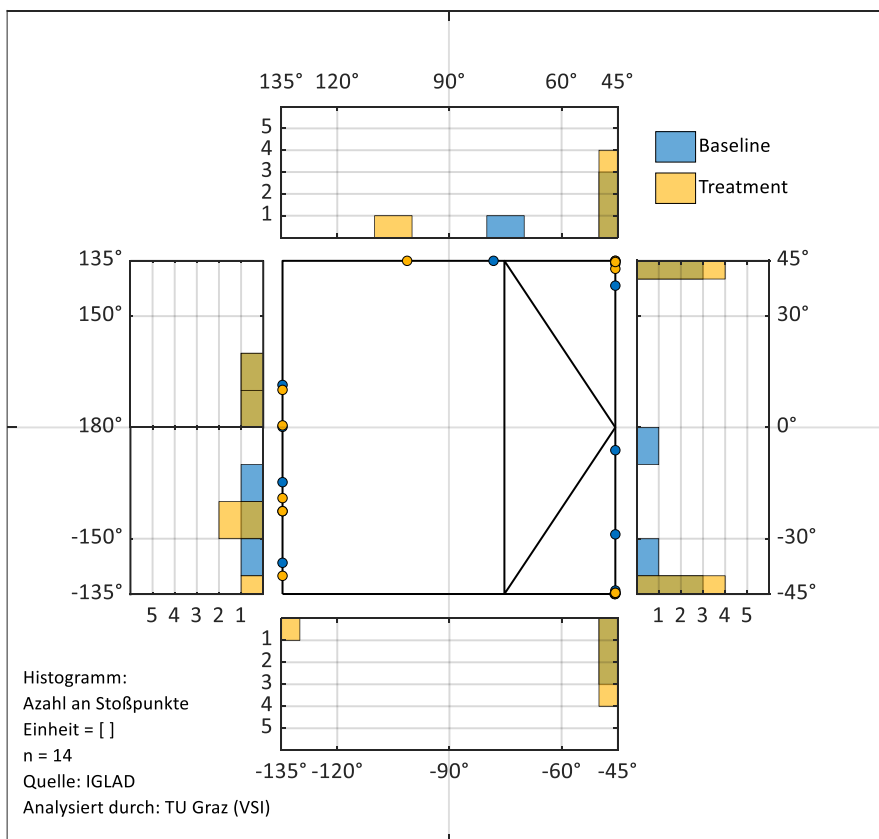


Abbildung 9-142: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 2 – Szenario 4 – Fahrzeug B

Kollisionswinkel - Unfalltyp 3 - Szenario 4 - Fahrzeug A

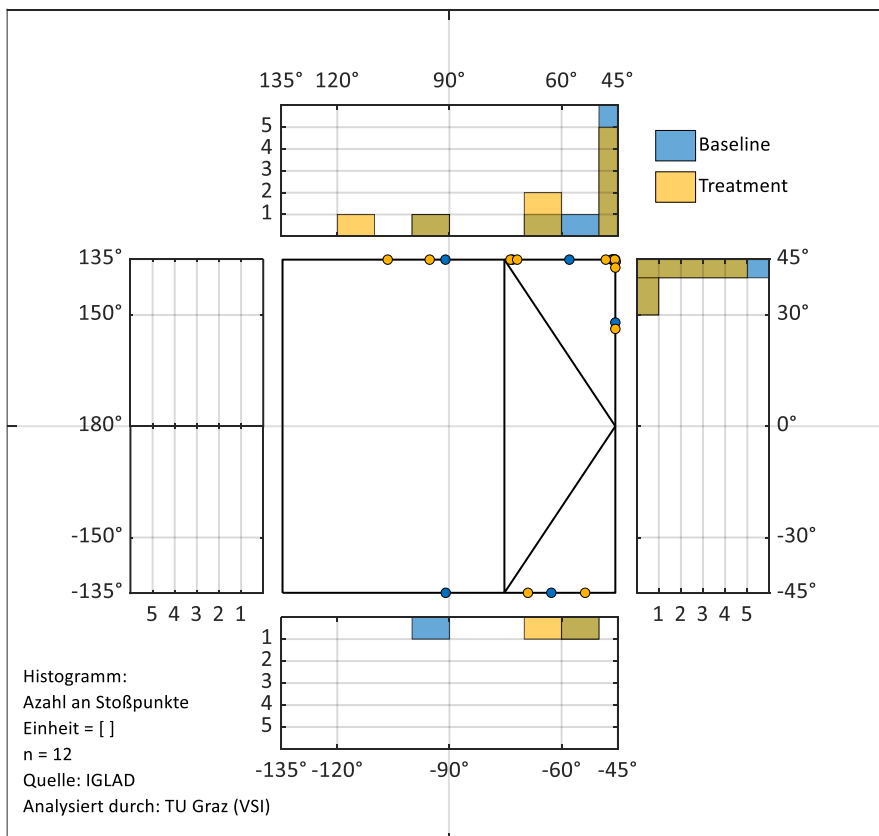


Abbildung 9-143: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 3 – Szenario 4 – Fahrzeug A

Kollisionswinkel - Unfalltyp 3 - Szenario 4 - Fahrzeug B

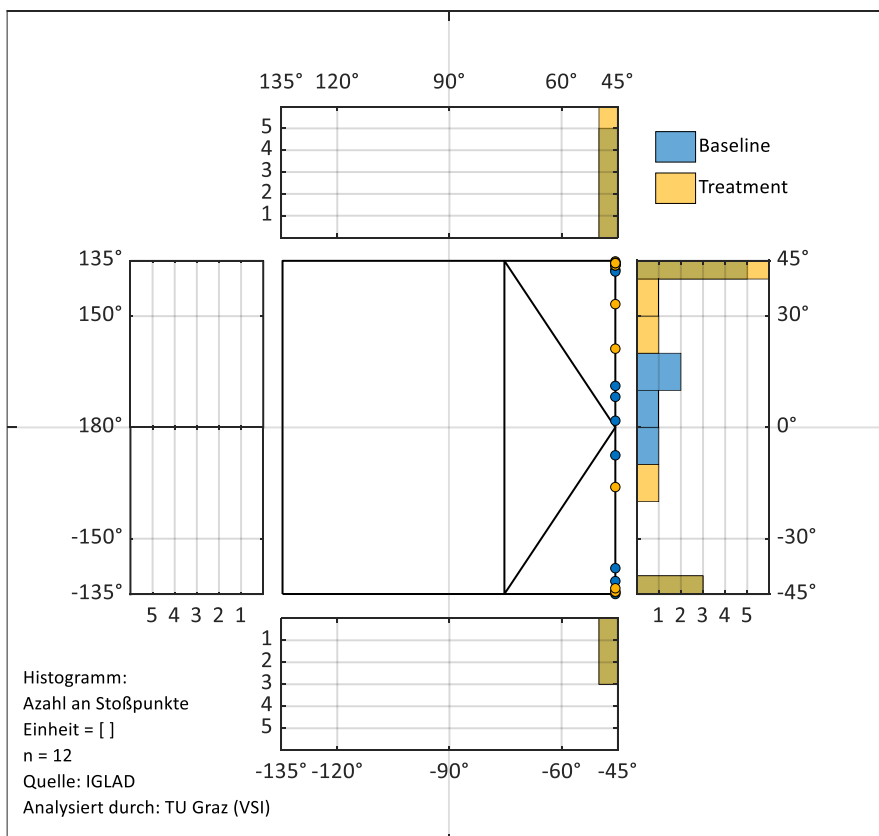


Abbildung 9-144: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 3 – Szenario 4 – Fahrzeug B

Kollisionswinkel - Unfalltyp 6 - Szenario 4 - Fahrzeug A

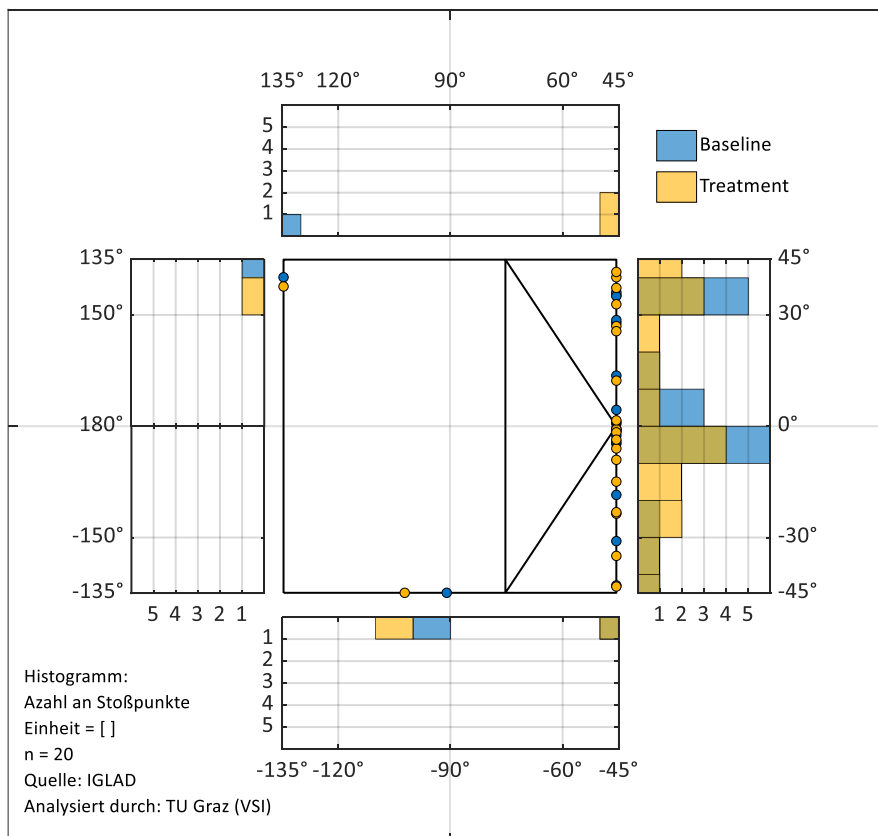


Abbildung 9-145: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 6 – Szenario 4 – Fahrzeug A

Kollisionswinkel - Unfalltyp 6 - Szenario 4 - Fahrzeug B

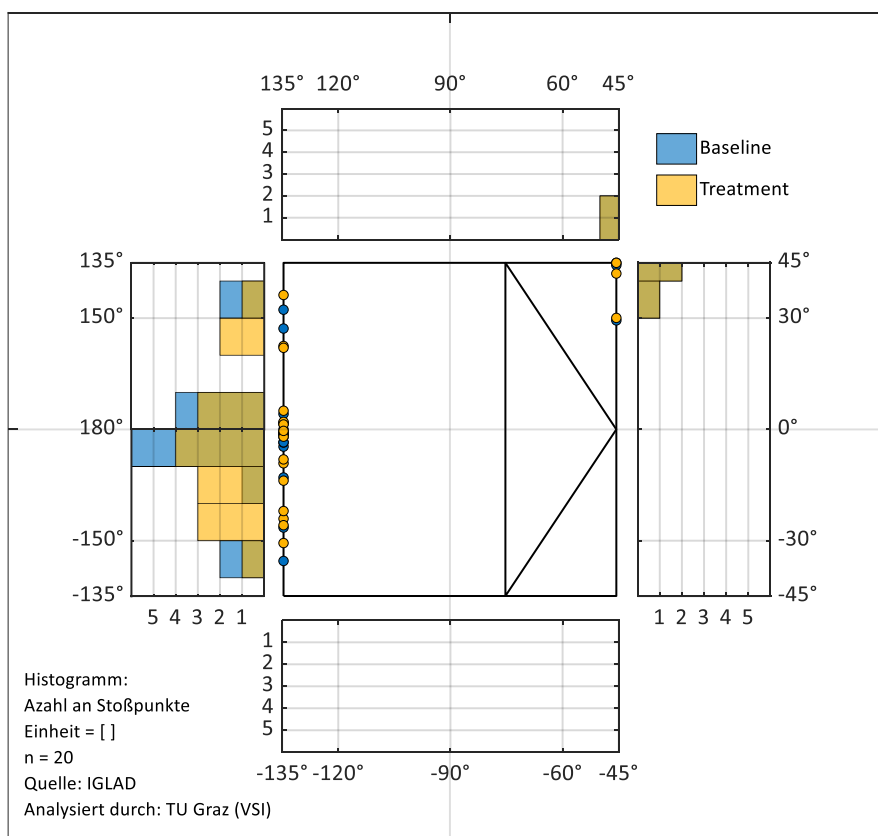


Abbildung 9-146: Verteilung der FPOC über die Fahrzeugkontur – Unfalltyp 6 – Szenario 4 – Fahrzeug B

B.4.3 Kollisionswinkel und Gierwinkel

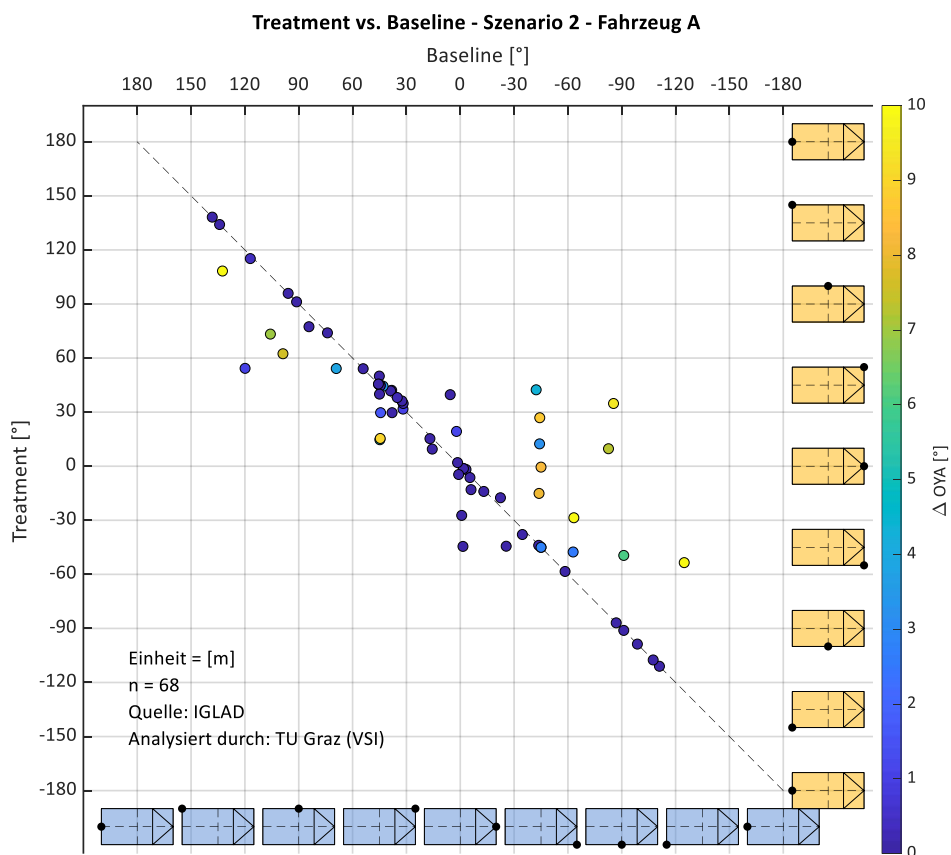


Abbildung 9-147: Änderung von CA und OYA – Szenario 2 – Fahrzeug A

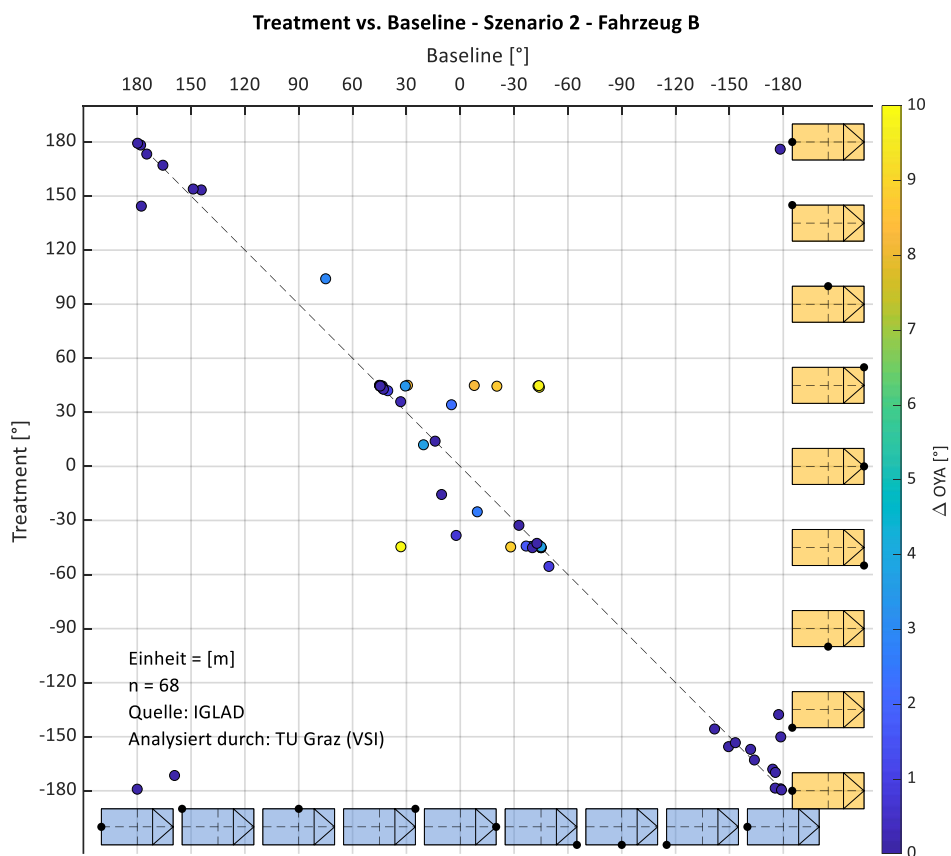


Abbildung 9-148: Änderung von CA und OYA – Szenario 2 – Fahrzeug B

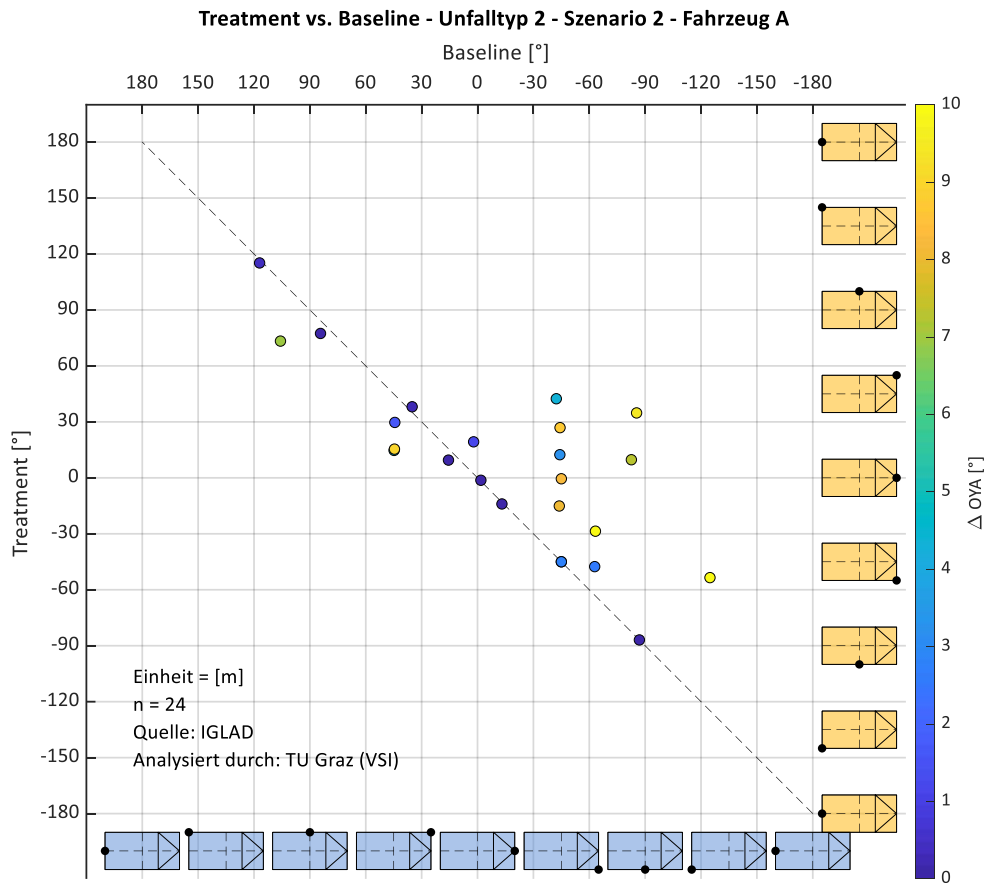


Abbildung 9-149: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 2 – Szenario 2 – Fahrzeug A

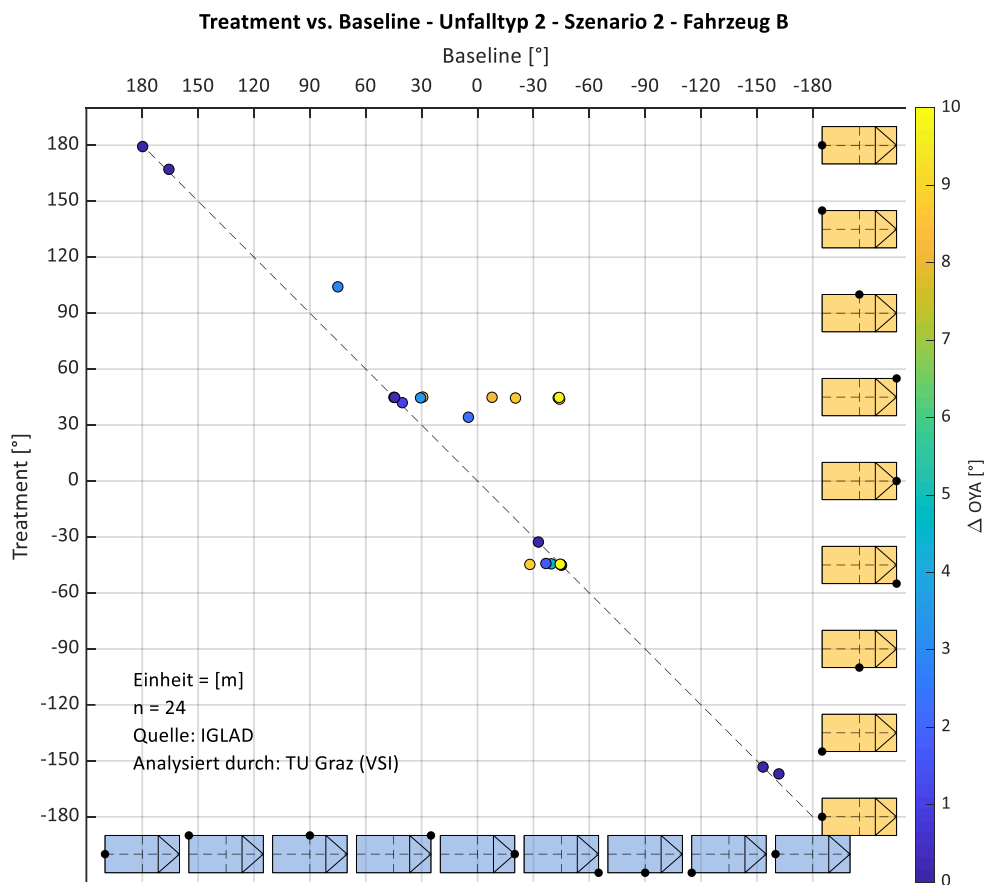


Abbildung 9-150: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 2 – Szenario 2 – Fahrzeug B

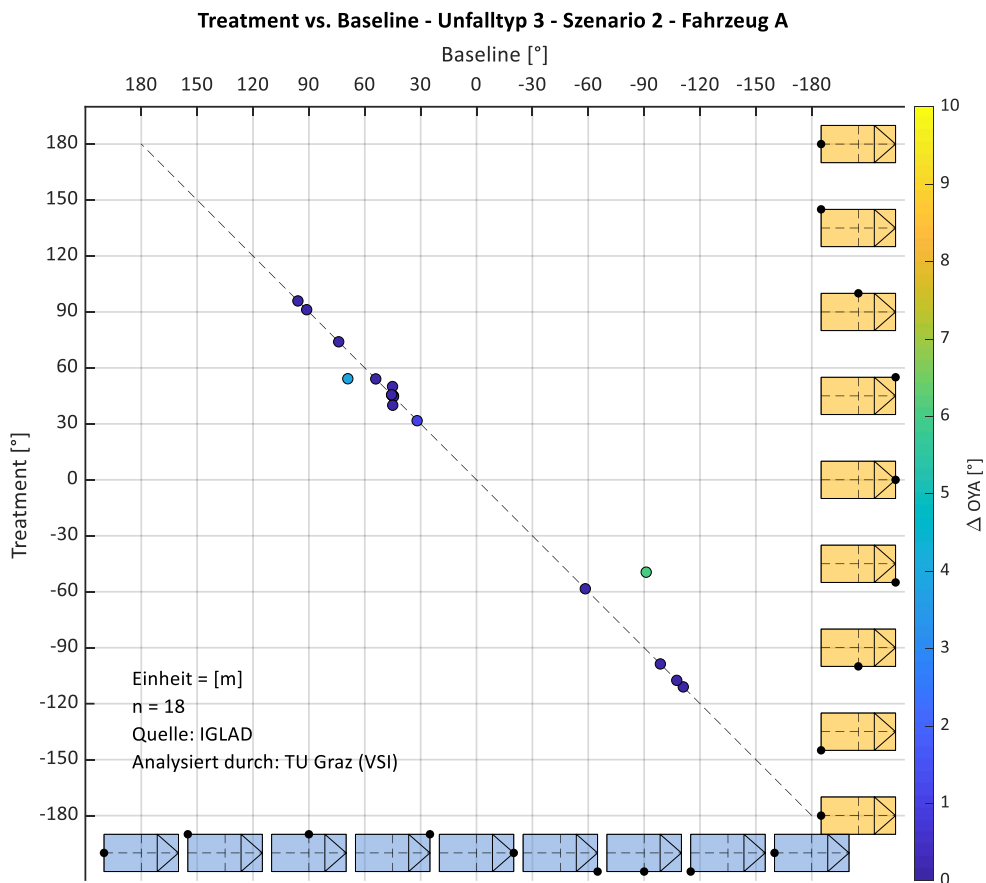


Abbildung 9-151: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 3 – Szenario 2 – Fahrzeug A

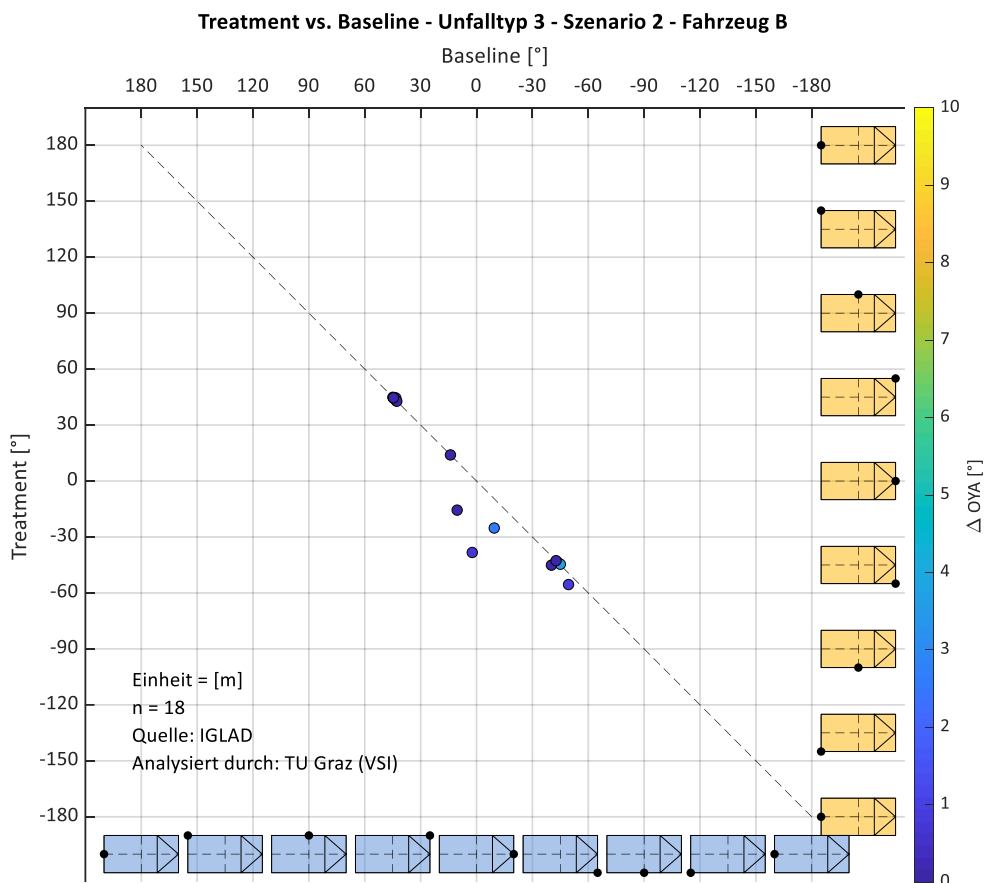


Abbildung 9-152: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 3 – Szenario 2 – Fahrzeug B

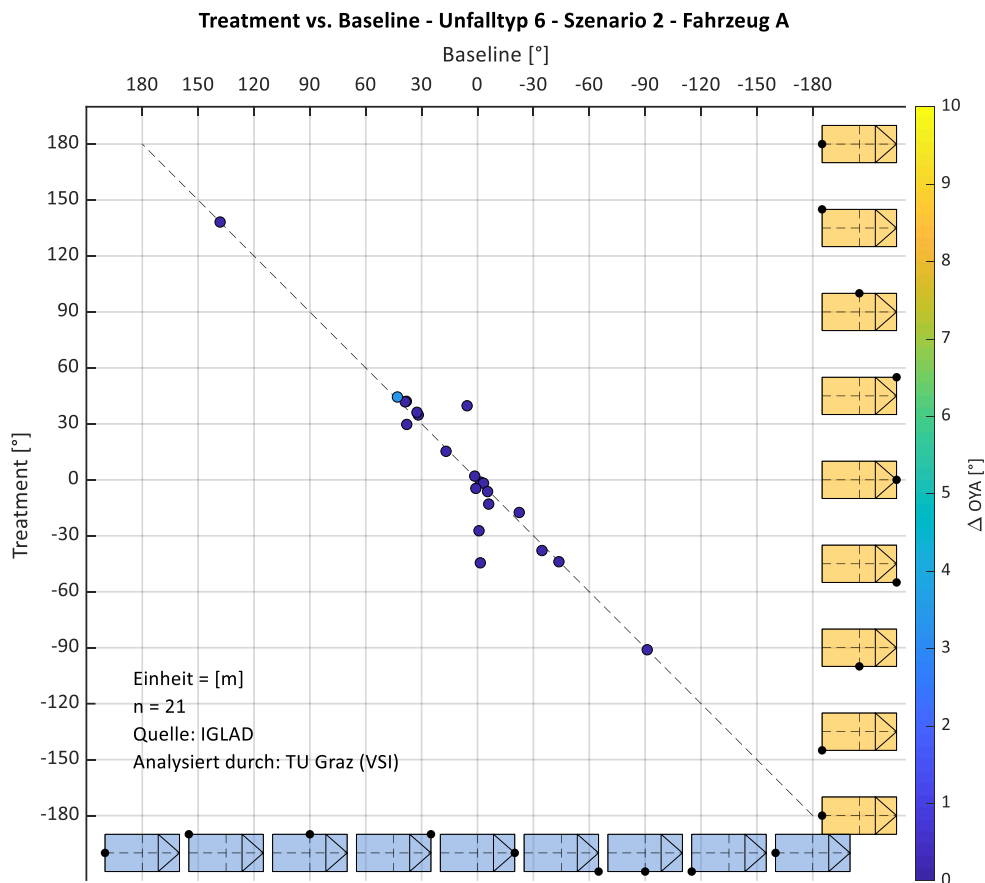


Abbildung 9-153: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 6 – Szenario 2 – Fahrzeug A

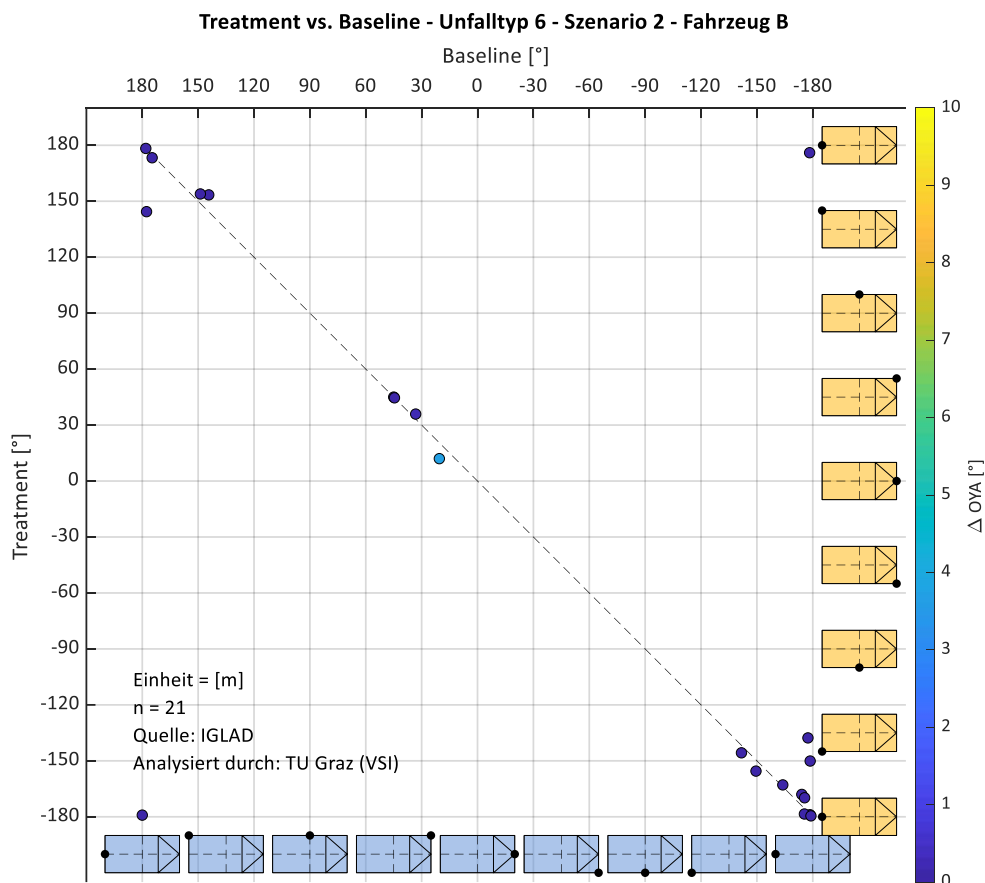


Abbildung 9-154: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 6 – Szenario 2 – Fahrzeug B

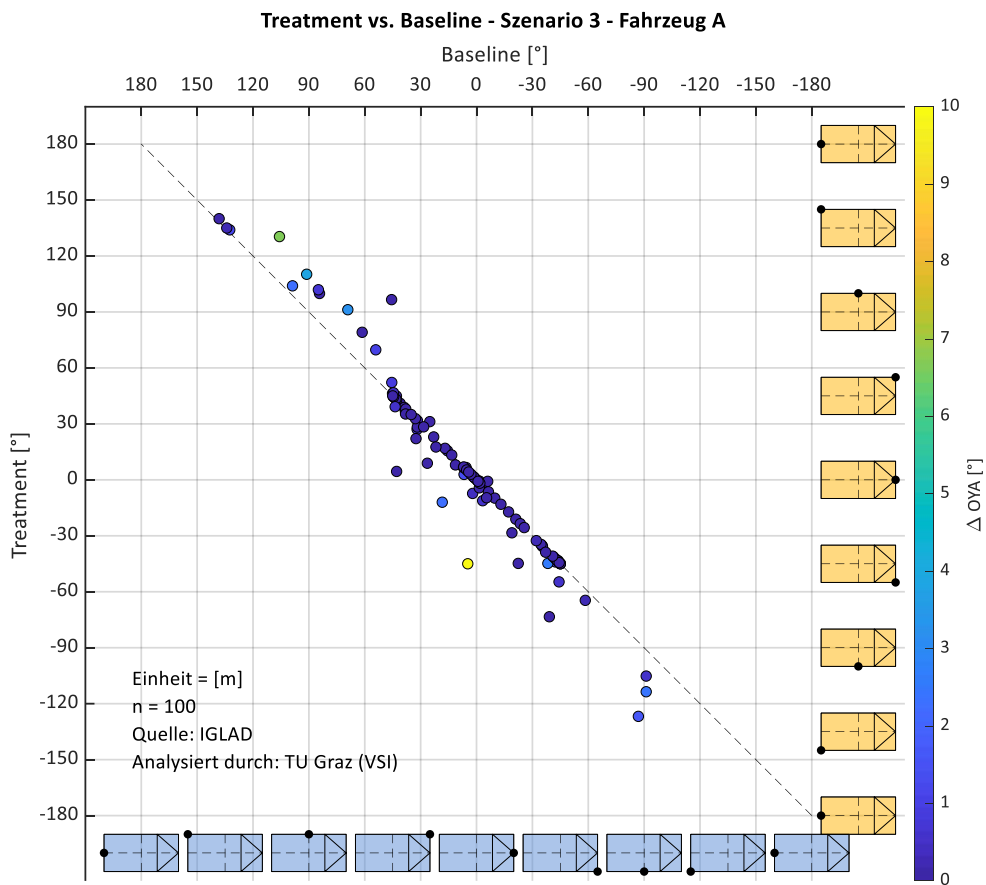


Abbildung 9-155: Änderung von CA und OYA – Szenario 3 – Fahrzeug A

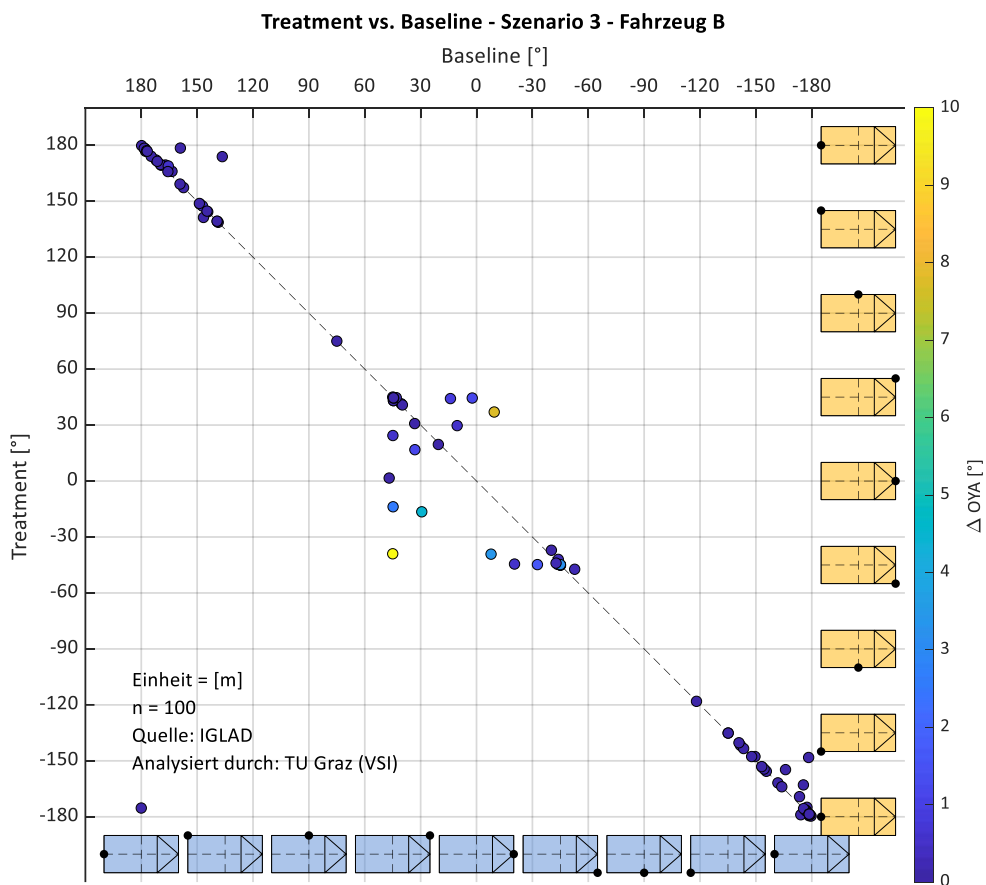


Abbildung 9-156: Änderung von CA und OYA – Szenario 3 – Fahrzeug B

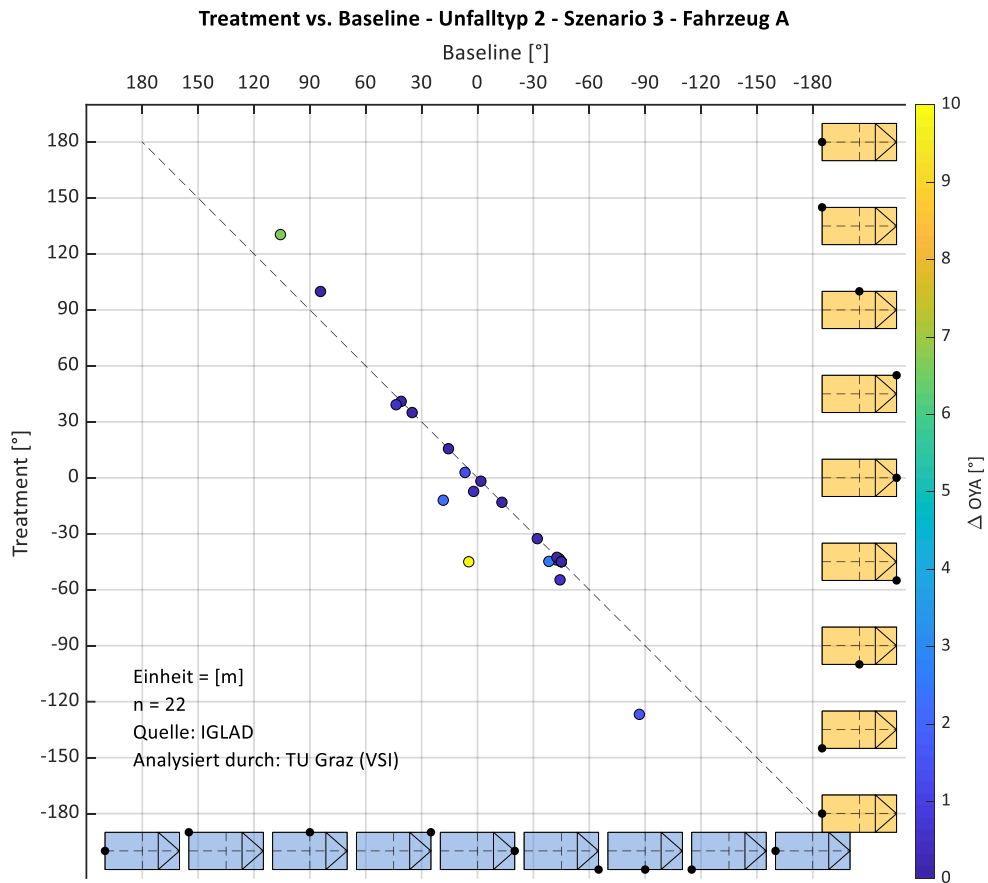


Abbildung 9-157: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 2 – Szenario 3 – Fahrzeug A

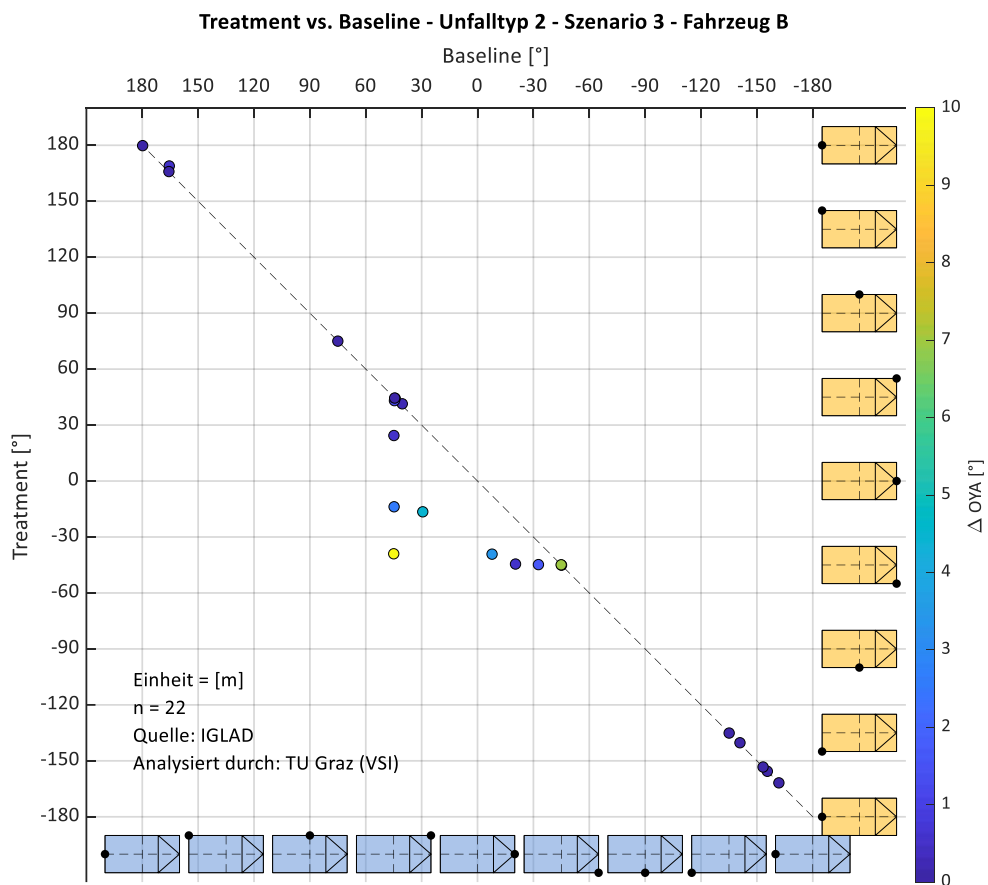


Abbildung 9-158: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 2 – Szenario 3 – Fahrzeug B

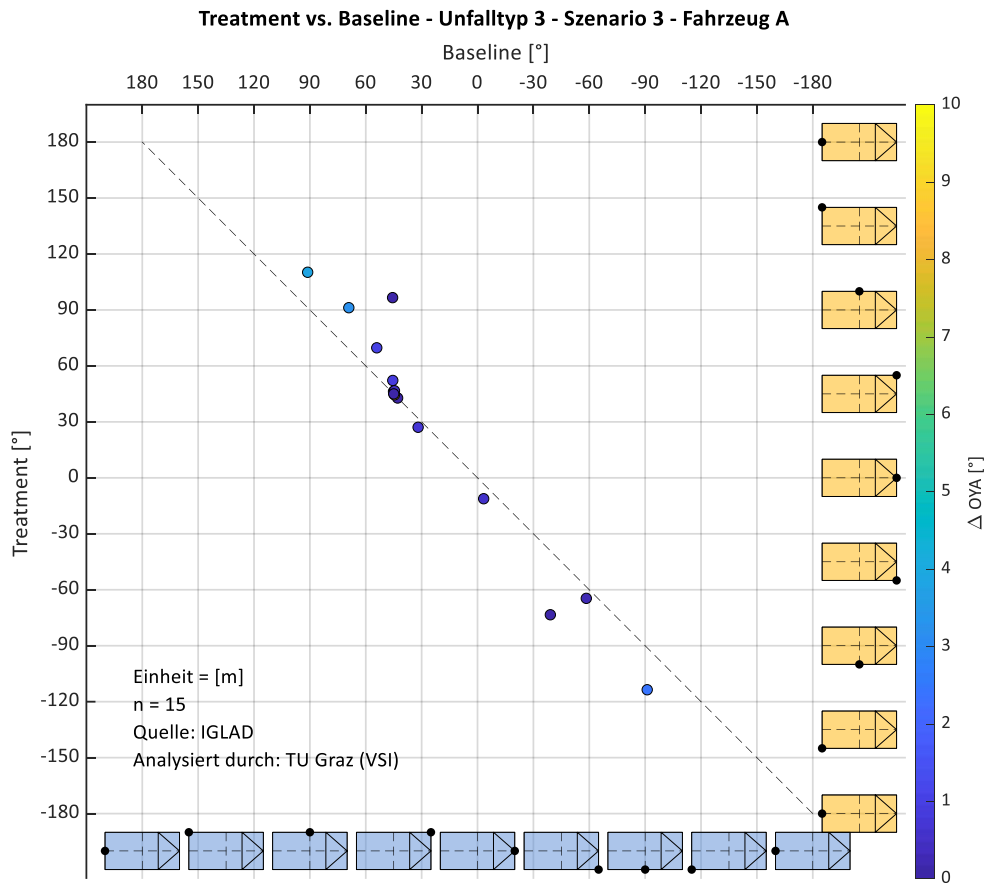


Abbildung 9-159: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 3 – Szenario 3 – Fahrzeug A

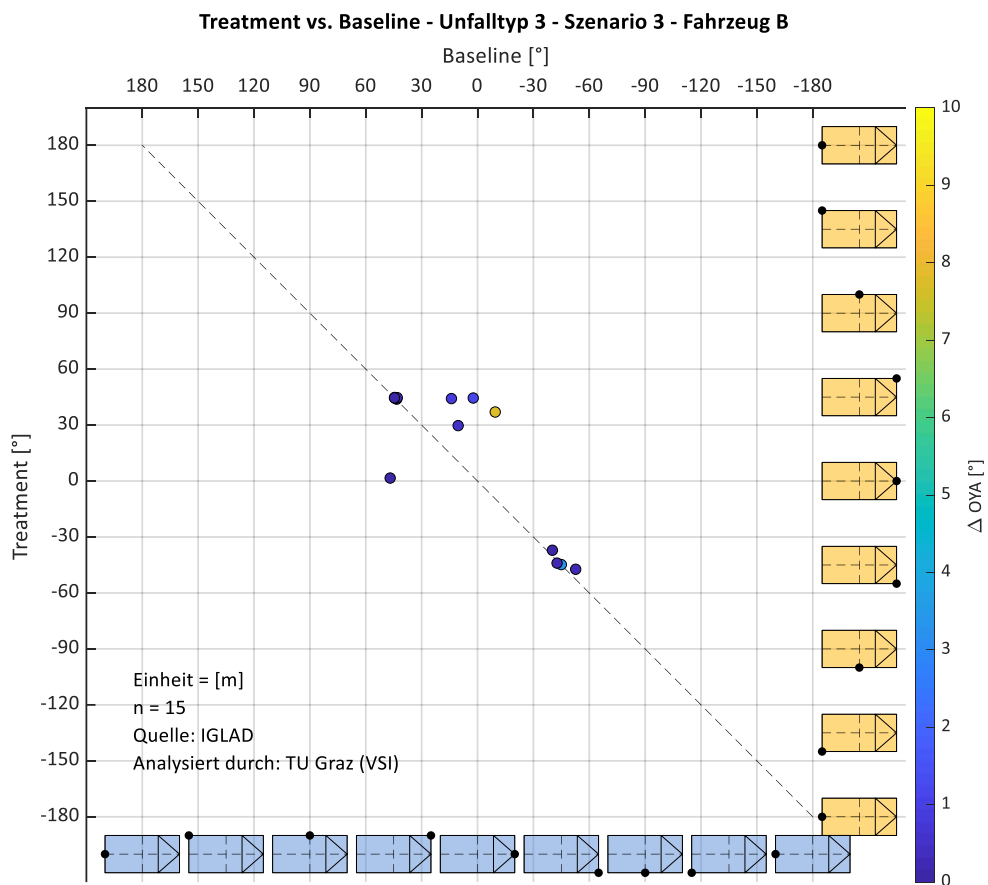


Abbildung 9-160: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 3 – Szenario 3 – Fahrzeug B

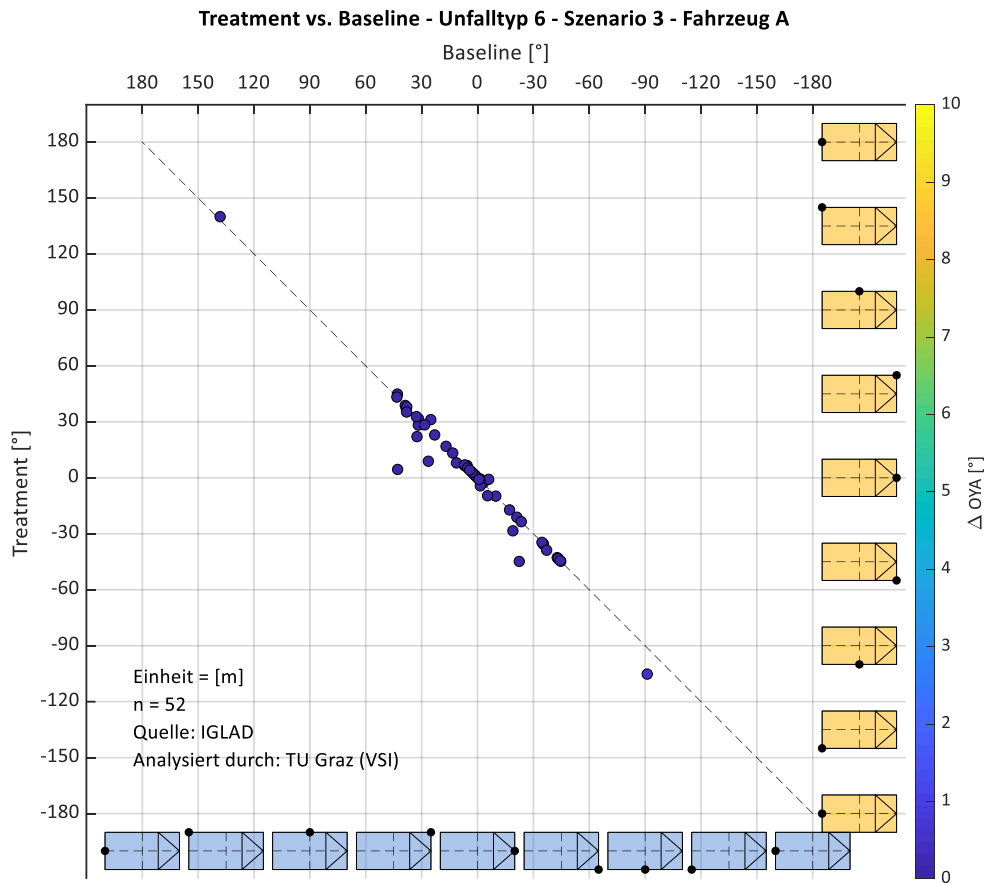


Abbildung 9-161: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 6 – Szenario 3 – Fahrzeug A

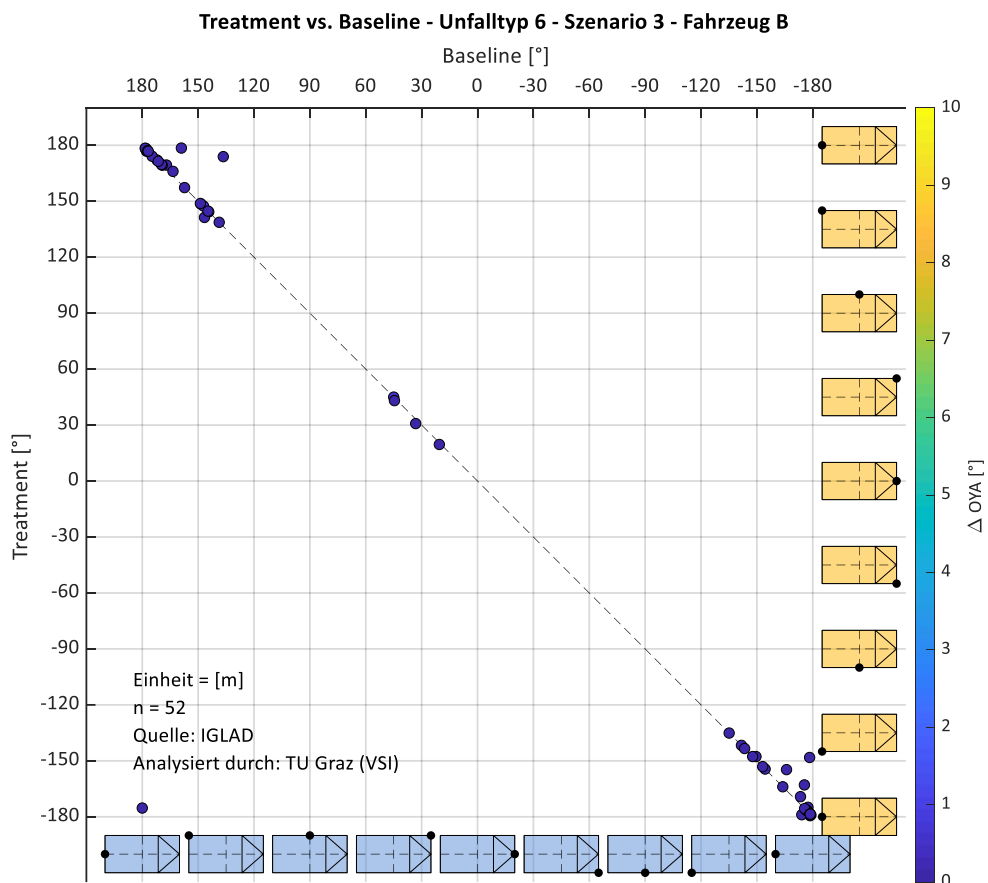


Abbildung 9-162: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 6 – Szenario 3 – Fahrzeug B

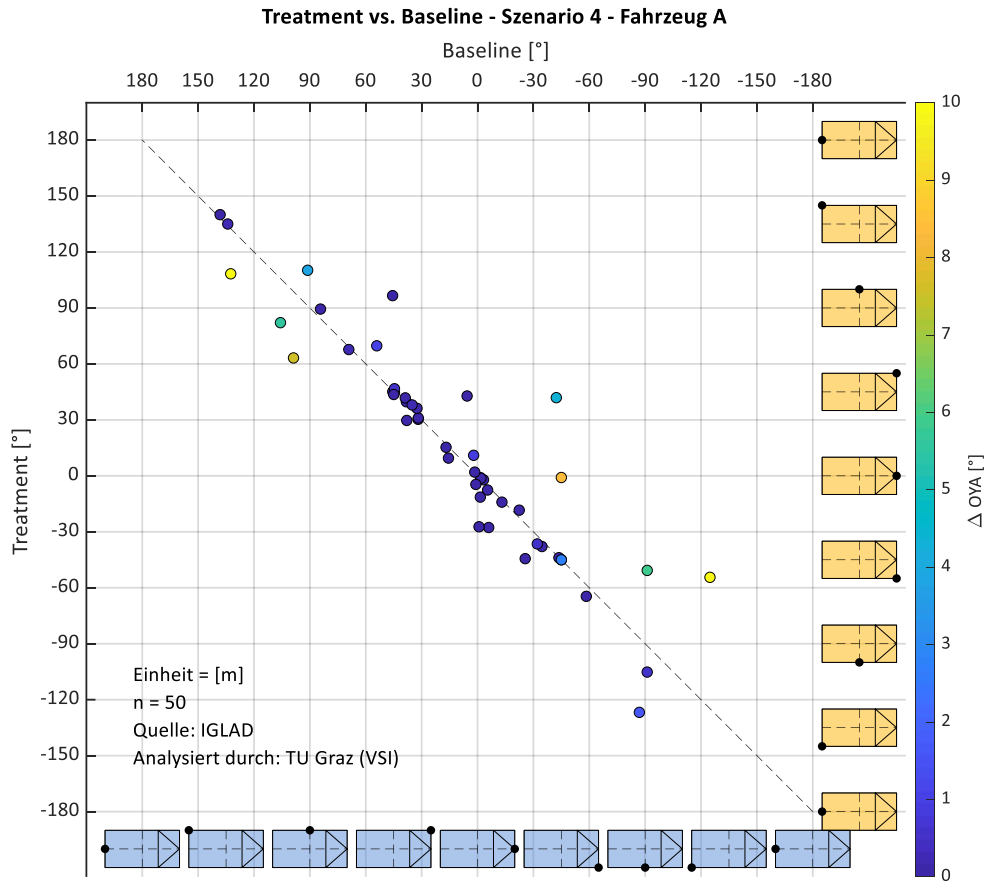


Abbildung 9-163: Änderung von CA und OYA – Szenario 4 – Fahrzeug A

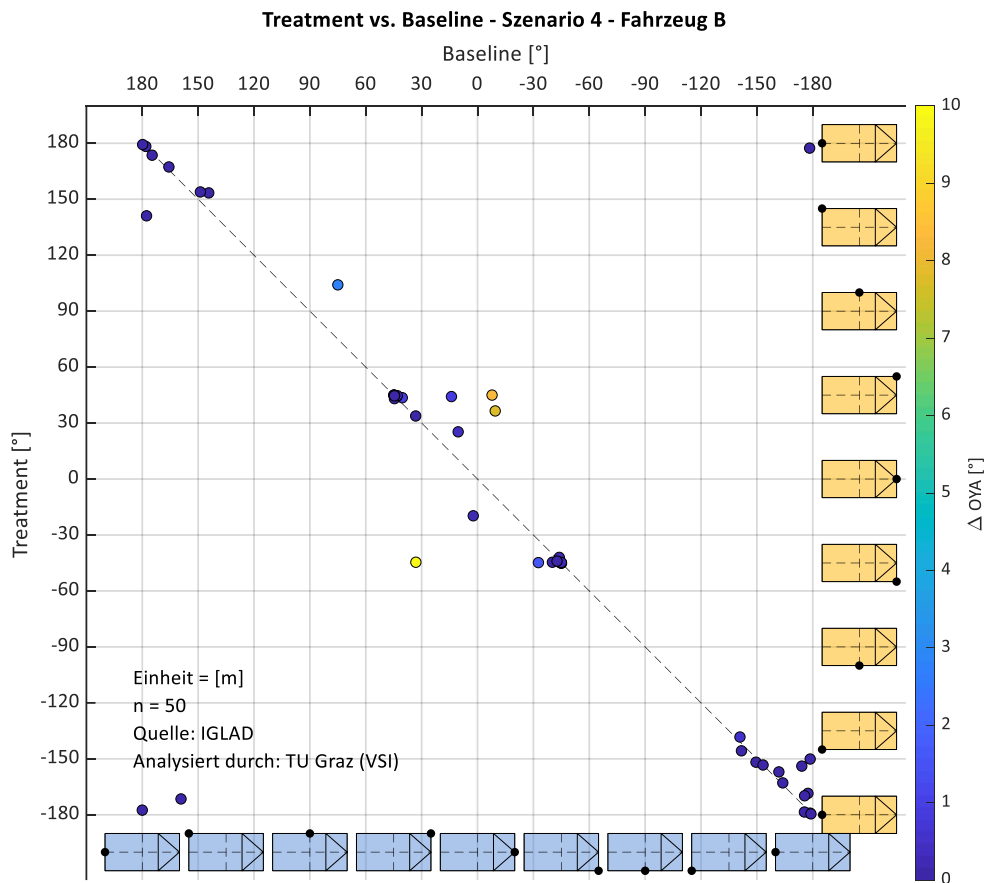


Abbildung 9-164: Änderung von CA und OYA – Szenario 4 – Fahrzeug B

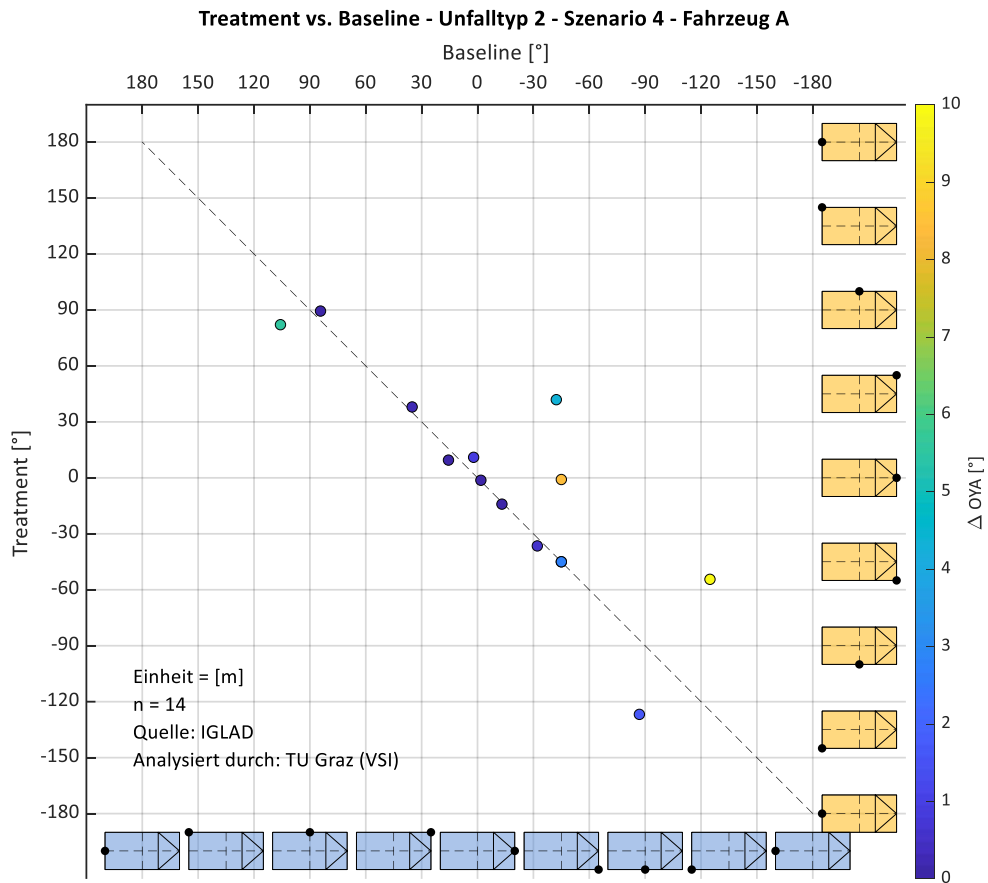


Abbildung 9-165: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 2 – Szenario 4 – Fahrzeug A

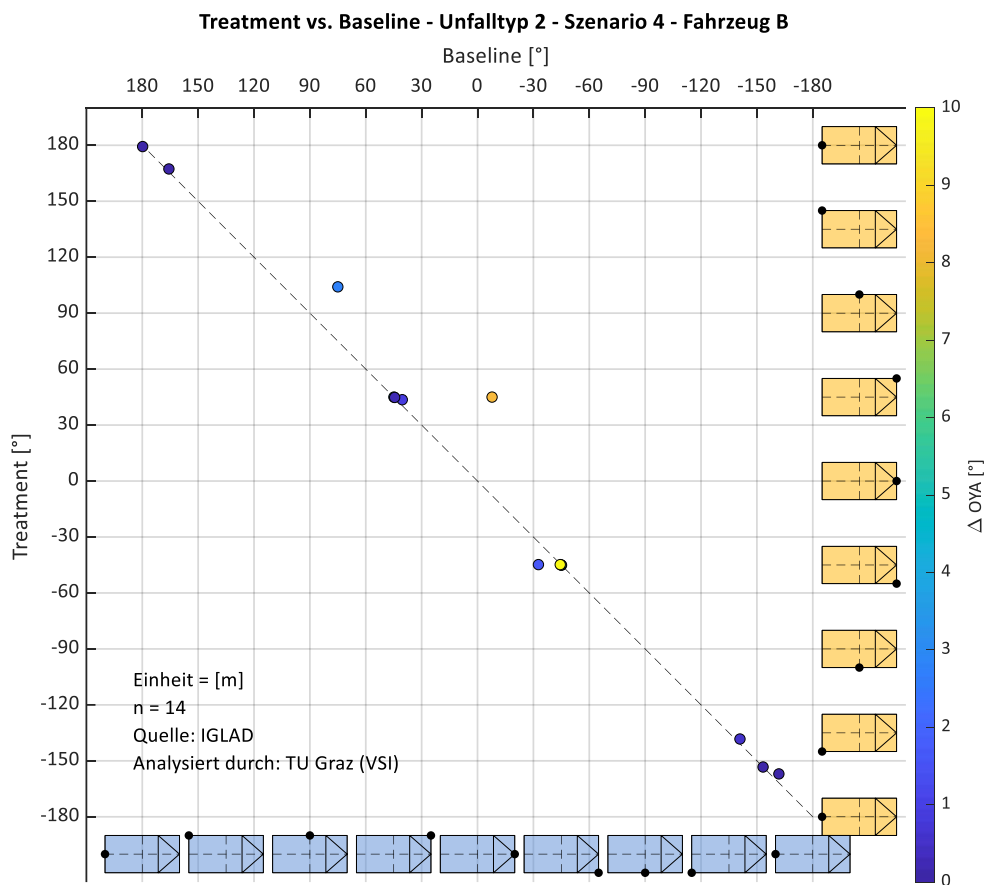


Abbildung 9-166: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 2 – Szenario 4 – Fahrzeug B

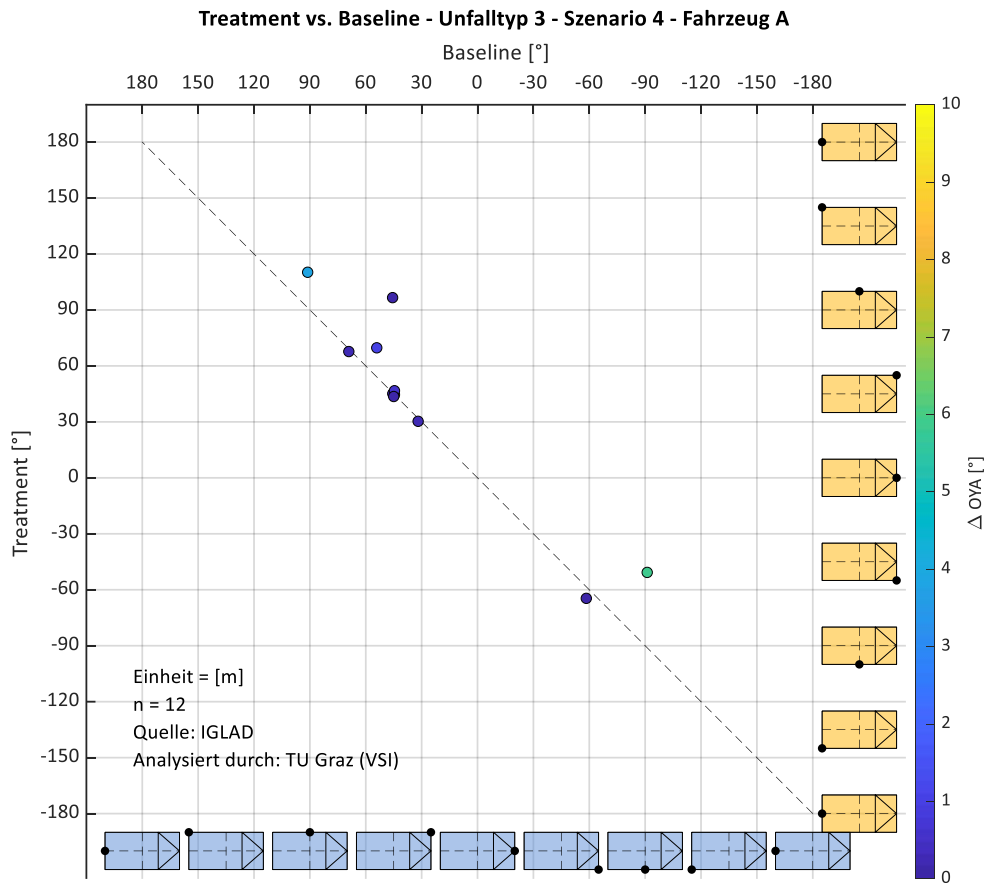


Abbildung 9-167: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 3 – Szenario 4 – Fahrzeug A

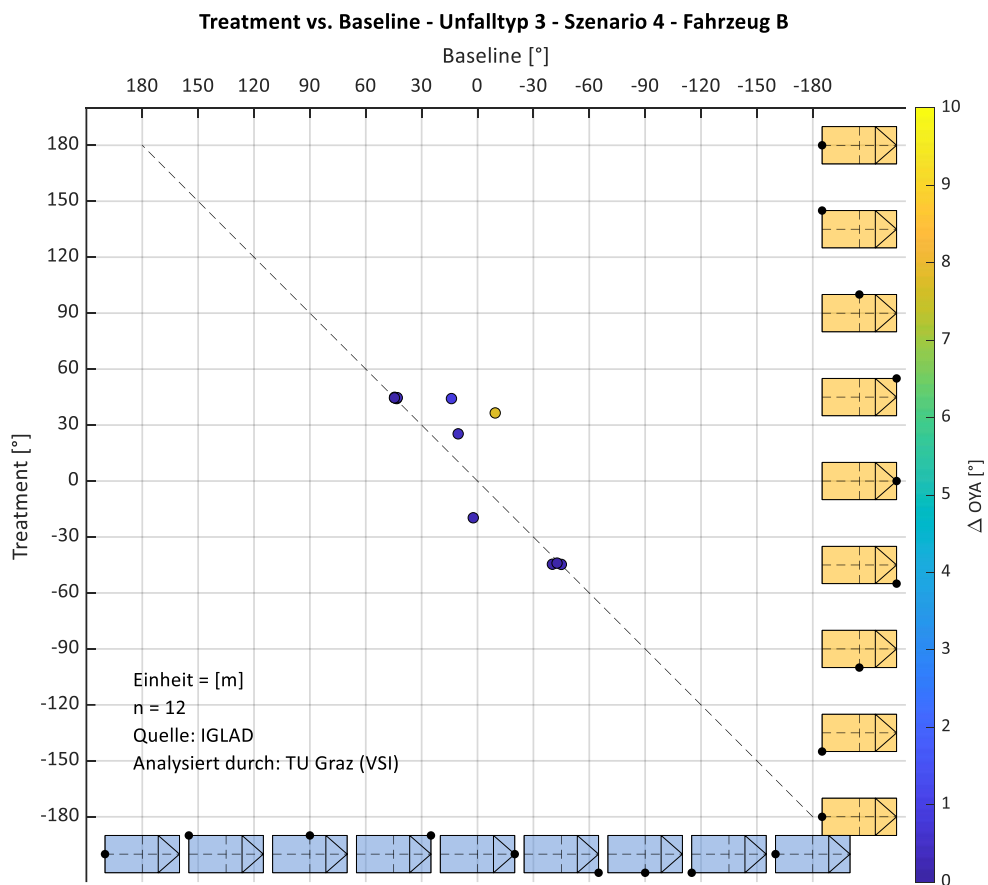


Abbildung 9-168: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 3 – Szenario 4 – Fahrzeug B

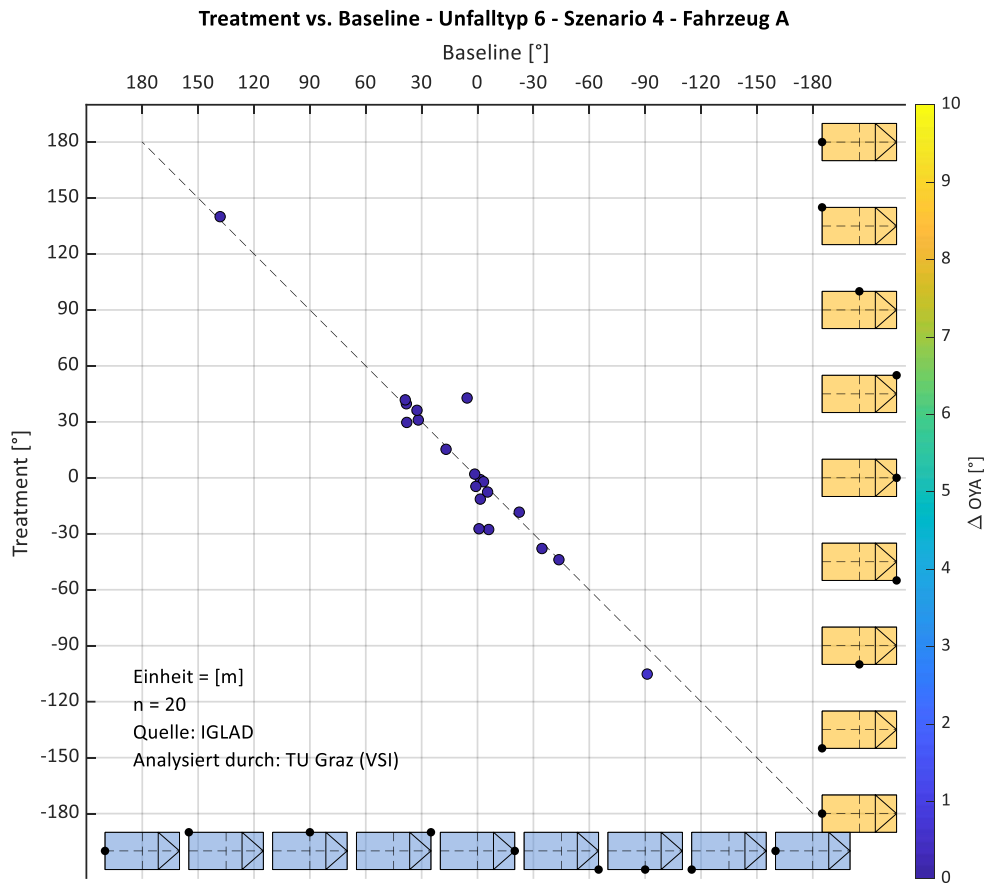


Abbildung 9-169: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 6 – Szenario 4 – Fahrzeug A

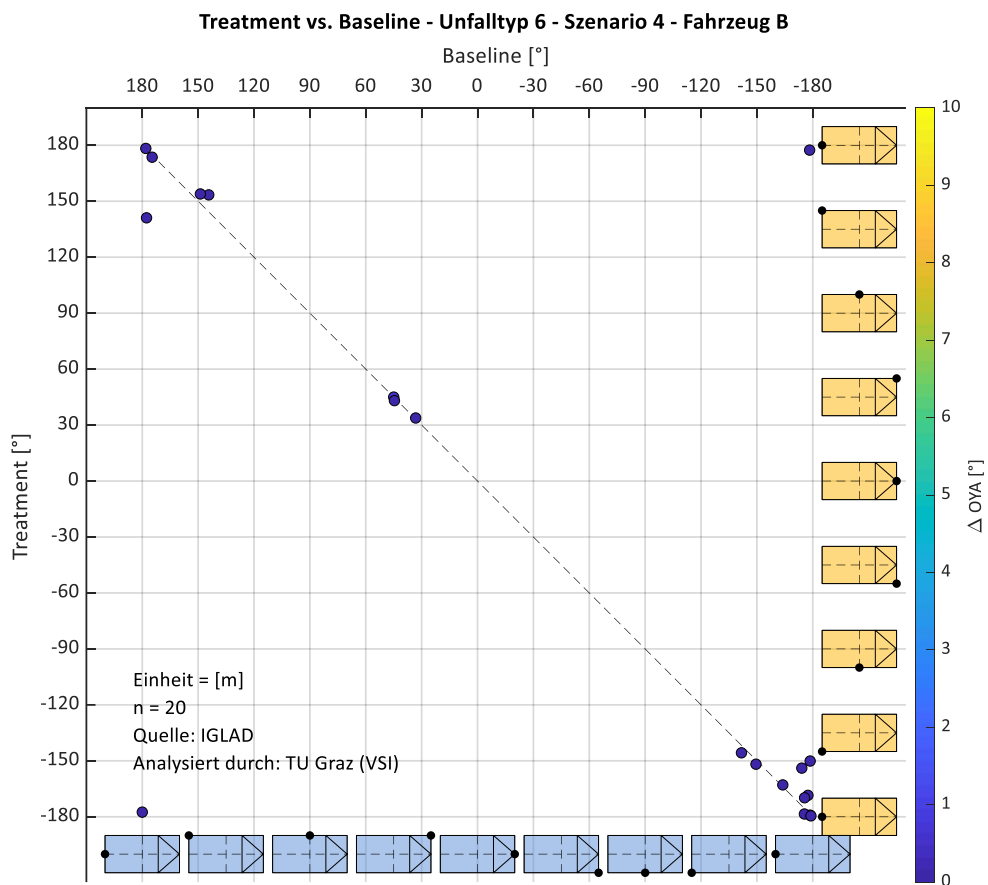


Abbildung 9-170: Änderung von CA und OYA – Unfalltyp 6 – Szenario 4 – Fahrzeug B

Anhang C: Filterkriterien-Katalog

Tabelle A-9-28: Auflistung der Filterkriterien des Filter 5

Faktor ID	Faktor
0	not applicable
1	none
2	alcohol
3	other stimulation substances, e.g. drugs, medication
4	drowsiness
5	other physical or psychical deficiencies
6	use of wrong lane (also wrong direction) or wrong parts of the road (e.g. shoulder)
7	violation against the rule of the road e.g. obligation to keep to right/left side)
8	speeding (exceeding speed limit)
9	excessive speed for conditions (no exceeding of speed limit)
10	lack of safety distance
11	heavy braking without obvious reason
12	overtaking on the wrong side (undertaking)
13	overtaking into oncoming traffic
14	overtaking though traffic situation is not clear
15	overtaking without adequate visibility
16	overtaking without consideration and adequate warning to following traffic
17	mistake in returning to initial lane
18	other overtaking mistakes
19	mistake when being overtaken, e.g. swerving, acceleratin
20	disregarding the oncoming traffic's right of way when passing stationary vehicle or obstacle
21	disregarding the following traffic's right of way when passing stationary vehicle or obstacle
22	failure during driving in congested traffic or lane merging
23	disregarding the traffic regulation "priority to the right"
24	disregarding the traffic regulation signs (give way)
25	disregarding the priority traffic when joining a motorway or dual carriageway
26	disregarding the right of way by vehicles joining from a track way
27	disregarding the direction of traffic regulation by traffic lights or police officers
28	disregarding the priority of oncoming traffic when shown by sign 208
29	disregarding the priority of railway traffic
30	mistake during turning
31	mistake during u-turn or reversing
32	failure during joining the flowing traffic
33	wrong behavior towards pedestrians at pedestrian crossings
34	wrong behavior towards pedestrians at traffic calmings for pedestrians
35	wrong behavior towards pedestrians when turning
36	wrong behavior towards pedestrians at public transport stops
37	wrong behavior towards pedestrians at other places
38	forbidden stopping or parking
39	failure of adequate warning for stopped/broken down vehicles, accident scenes, or stopped school busses
40	traffic rule violation during vehicle loading or unloading
41	disregarding the lighting regulations
42	overloading
43	not adequately secured cargo
44	other mistakes of the driver
45	defective lighting
46	defective tires
47	defective brakes
48	defective steering
49	defective towing device
50	other technical deficiencies
51	wrong behavior of the pedestrian in traffic situations regulated by traffic lights or police officers
52	wrong behavior of the pedestrian at crossings without regulation by traffic lights or police officers
53	wrong behavior of the pedestrian near crossings or junctions, traffic lights or pedestrian crossings during dense traffic in other places
54	wrong behavior of the pedestrian due to sudden emergence from view restricted areas
55	wrong behavior of the pedestrian (ignoring the road traffic)
56	other wrong behavior of the pedestrian
57	wrong behavior of the pedestrian due to nonusage of pedestrian path
58	wrong behavior of the pedestrian due to usage of wrong road side
59	wrong behavior of the pedestrian due to playing on or besides the road
60	wrong behavior of the pedestrian due to other mistakes

Anhang: Filterkriterien-Katalog

61	road soiling due to oil leakage
62	other road soiling by road users
63	snow, ice
64	rain
65	other influences (leaves, clay etc.)
66	lane grooves in combination with rain, snow, ice
67	other state of the road
68	inappropriate road sign condition
69	inadequate street lighting
70	inadequate securing of railway crossings
71	influence of weather / view obstruction due to fog
72	influence of weather / view obstruction due to rain, hail, snow
73	influence of weather / view obstruction due to sun glare
74	influence of weather / view obstruction due to cross wind
75	influence of weather / view obstruction due to storm
76	inappropriate or not secured construction site on the road
77	game animals on road
78	other animal on road
79	other obstacles on the road
80	other causes
81	darkness
82	another vehicle which is gone
99	unknown

Anhang D: Unfalltypen-Katalog

Tabelle A-9-29: Unfalltypen-Katalog – Unfalltyp 1 [25]

Type 1: Loss of control accident





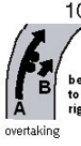















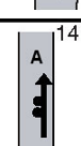
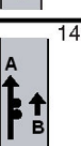



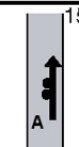



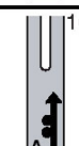



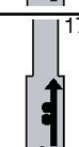



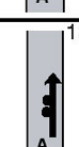
without other influence	10  curve	101  bend to left	102  bend to right	103  bend to left overtaking	104  bend to right overtaking			109 run of curve unknown	
	11  turning priority rd.	111  A	112  A	113  A overtaking	114  A overtaking				119 unknown on turning priority rd.
	12  when turning or entering	121  A	122  A	123  A					129 unknown direction when turning or entering
	13  swaying road	131  A	132  A	133  A overtaking	134  A overtaking				139 unknown direction swaying road
	14  straight	141  A	142  A overtaking						149 unknown on straight road
... with influence of:	15  incline decline	151  A	152  A	153  A				159 unknown direction incline decline	
	16  traffic island	161  A	162  A	163  A					169 unknown direction traffic island
	17  road narrowing	171  A	172  A	173  A					179 unknown direction road narrowing
	18  bumpy road	181  A	182  A	183  A					189 unknown direction bumpy road
	19 other driving accidents							199 other driving accidents	

Tabelle A-9-30: Unfalltypen-Katalog – Unfalltyp 2 [25]

Type 2: Turning off accident

turning off (left)	20 following traffic	201	202	203 cyclist from bicycle lane	204 change lane for turning off		209 unknown following traffic
	21 oncoming traffic	211	212	213	214	215	219 unknown oncoming traffic
	22 special path/track	221	222	223	224	225	229 unknown special path/track
turning off (right)	23 following traffic	231	232	233 change lane for turning off			239 unknown following traffic
	24 special path/track	241	242	243	244	245	249 unknown special path/track
25 two turning vehicles	251	252					259 unknown directions two turning vehicles
26 turning-/waiting-vehicle	261 if not Type 3	262 if not Type 3					269 unknown directions turning- and waiting veh.
27 turning to leave a priority road	271	272	273	274	275		279 unknown directions priority road
28 turning veh. at turning signals	281	282	283	284	285	286	289 unknown directions at turning signals
29 unknown or other turning off accidents							299 unknown or other turning off accidents

Tabelle A-9-31: Unfalltypen-Katalog – Unfalltyp 3 [25]

Type 3: Turning in / crossing accident

straight priority road	30	301	302	303	304	305	306	309
	from the left							from the left unknown details
	31	311	312	313	314	315		319
	overtaker from the left							overtaker from left unknown details
	32	321	322	323	324	325	326	329
	from the right							from the right unknown details
	33	331	332	333	334	335		339
	overtaker from the right							overtaker from right unknown details
	34	341	342	343	344			349
	from bicycle path							from bicycle path unknown details
35	351	352	353	354	355		359	
turning priority road							turning priority road unknown details	
36	361	362	363	364			369	
level crossing	junction no gate	junction no gate	junction with gate	junction with gate			level crossing unknown details	
37	371	372	373	374			379	
crossing or entering bicycle							crossing or entering bicycle unknown details	
39							399	
unknown or other turning in/crossing							unknown or other turning in/crossing	

Tabelle A-9-32: Unfalltypen-Katalog – Unfalltyp 4 [25]

Type 4: Pedestrian crossing road accident

on road	no junction	40	401	402	403	404	405		409	pedestrian on road from left unknown details
		41	411	412	413	414			419	pedestrian on road from left sight obstr. unknown details
	junction	42	421	422	423	424			429	pedestrian on road from right unknown details
		43	431	432	433	434	435	436	439	pedestrian before junction from left sight obstr. unknown details
before junction	no junction	44	441	442	443	444			449	pedestrian before junction from left sight obstr. unknown details
		45	451	452	453	454	455		459	pedestrian before junction from right unknown details
	junction	46	461	462	463	464	465		469	pedestrian behind junction from left unknown details
		47	471	472	473				479	pedestrian behind junction from right unknown details
behind junction	turning priority road	48	481	482	483	484	In Case of Traffic Lights see accident Type 2 (Turning off accidents)		489	pedestrian on turning priority road unknown details
	at junctions: diagonal cross or getting on/off trams or other Pedestrian crossing accidents	49	491	492	493	494			499	pedestrian crossing unknown details or other

Tabelle A-9-33: Unfalltypen-Katalog – Unfalltyp 5 [25]

Type 5: Stationary traffic accident

<p>50 run into</p>	<p>501</p>	<p>502</p>					<p>509 run into unknown/other details</p>
<p>51 swing out and following traffic</p>	<p>511</p>	<p>512</p>					<p>519 unknown/other details</p>
<p>52 swing out and oncoming traffic</p>	<p>521</p>						
<p>53 swing out and pedestrian</p>	<p>531</p>	<p>532</p>	<p>533</p>	<p>534</p>			<p>539 unknown/other details</p>
<p>54 stopping parking also Busstop</p>	<p>541</p>	<p>542</p>	<p>543</p>				<p>549 stopping parking unknown/other details</p>
<p>55 driveway/ leaving a parking pl./ lateral</p>	<p>551</p>	<p>552</p>	<p>553</p>	<p>554</p>	<p>555</p>		<p>559 unknown/other details</p>
<p>56 leaving parking place forwards transverse</p>	<p>561</p>	<p>562</p>					<p>569 unknown/other details</p>
<p>57 leaving parking place backwards transverse</p>	<p>571</p>	<p>572</p>					<p>579 backwards unknown/other details</p>
<p>58 door/ getting in/out of vehicle loading</p>	<p>581 door or getting in/out</p>	<p>582 door or getting in/out</p>	<p>583 loading</p>	<p>584 loading</p>			<p>589 unknown/other details or loading</p>
<p>59 vehicle turning in/ turning off other</p>	<p>591</p>	<p>592</p>	<p>593</p>	<p>594</p>			<p>599 other or unknown accidents with parking traffic</p>


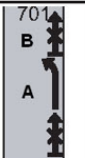
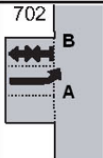


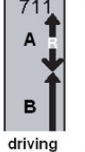
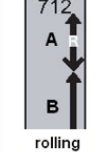
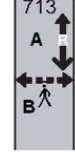
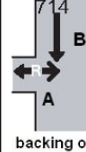
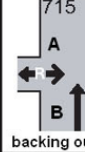



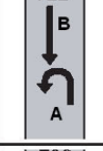
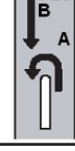

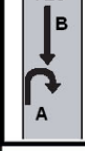
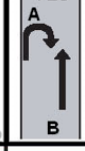










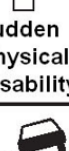


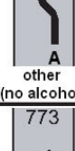

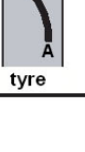

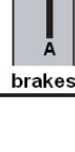
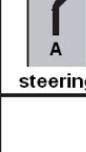
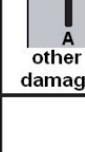
Tabelle A-9-34: Unfalltypen-Katalog – Unfalltyp 6 [25]

Type 6: Longitudinal traffic accident

Vehicle in front ...	60	601	602	603	604		609
	↑ vehicle driving in front	B ↑ A ↑	B ↑ A ↑	B ↑ A ↑	B ↑ A ↑		↑ vehicle driving in front ↑ lane uncertain
	61	611	612	613	614		619
	↑ traffic jam	↑ traffic jam B ↑ A ↑	↑ traffic jam B ↑ A ↑	↑ traffic jam B ↑ A ↑	↑ traffic jam B ↑ A ↑		↑ traffic jam in front ↑ lane uncertain
	62	621	622	623	624		629
↑ non priority vehicle	↑ W B ↑ A ↑	↑ W B ↑ A ↑	↑ traffic lights B ↑ A ↑	↑ level crossing B ↑ A ↑		unknown/other details	
63	631	632	633	634	635	639	
↙ lane change to left because...	↙ vehicle in front B ↑ A ↑	↙ traffic jam B ↑ A ↑	↙ end of lane B ↑ A ↑	↙ turning lane B ↑ A ↑	↙ after overtaking on right lane B ↑ A ↑	↙ lane change to left ↑ unknown/other details	
64	641	642	643	644	645	646	649
↘ lane change to right because...	↘ vehicle in front A ↑ B ↑	↘ traffic jam A ↑ B ↑	↘ end of lane A ↑ B ↑	↘ turning lane A ↑ B ↑	↘ after overtaking on oppos. lane A ↑ B ↑	↘ after overtaking on lane in same direction A ↑ B ↑	↘ lane change to right ↑ unknown/other details
65	651	652					
↑↑ driving side by side	↑↑ A ↑ B ↑	↑↑ A ↑ B ↑					
66	661	662	663	664			669
↙ overtaking oncoming traffic	↙ B ↓ A ↑	↙ B ↓ A ↑	↙ B ↓ A ↑	↙ B ↓ A ↑			↙ overtaking oncoming traffic ↑ unknown/other details
67	671	672	673	674	675		679
↑ Pedestrian	↑ B ↑ A ↑	↑ B ↑ A ↑	↑ B ↑ A ↑	↑ B ↑ A ↑	↑ Pedestrian sitting/standing (no direction) B ↑ A ↑		↑ Pedestrian ↑ unknown/other details
68	681	682	683	684	685	686	689
↙ head-on encounter	↙ A ↓ B ↑	↙ B ↓ A ↑	↙ B ↓ A ↑	↙ A ↓ B ↑	↙ A ↓ B ↑	↙ A ↓ B ↑	↙ head-on encounter ↑ unknown/other details
69	No Type 1 (Driving) Accidents!!						699
unknown/other accident in longitudinal traffic							unknown/other accident in longitudinal traffic

Tabelle A-9-35: Unfalltypen-Katalog – Unfalltyp 7 [25]

Type 7: Other accident

 <p>70 parking vehicle</p>	 <p>701</p>	 <p>702</p>	 <p>703 at car park</p>				<p>709 parking vehicle unknown/other details</p>
 <p>71 backing up</p>	 <p>711 driving</p>	 <p>712 rolling</p>	 <p>713 backing out</p>	 <p>714 backing out</p>	 <p>715 backing out</p>	 <p>716 rolling without driver</p>	<p>719 backing up unknown/other details</p>
 <p>72 u-turn</p>	 <p>721</p>	 <p>722</p>	 <p>723</p>	 <p>724</p>	 <p>725</p>	 <p>726</p>	<p>729 u-turn unknown/other details</p>
 <p>73 not fixed object</p>	 <p>731 load</p>	 <p>732 other</p>					
 <p>74 broken down vehicle</p>	 <p>741 accident</p>	 <p>742 break down</p>					<p>749 break down unknown/other details</p>
 <p>75 animal</p>	 <p>751 wild animal</p>	 <p>752 unattended domestic anim.</p>	 <p>753 attended domestic anim.</p>				<p>759 animal unknown/other details</p>
 <p>76 sudden physical disability</p>	 <p>761 falling asleep</p>	 <p>762 dizzy spell</p>	 <p>763 other (no alcohol)</p>				
 <p>77 sudden vehicle damage</p>	 <p>771 tyre</p>	 <p>772 windshield</p>	 <p>773 brakes</p>	 <p>774 steering</p>	 <p>775 other damage</p>		
<p>78</p>							
<p>79 all other accidents</p>							<p>799 other accident</p>

Symbols












	Vehicle (driving)		non involved Vehicle (driving)
	Vehicle (loss of control)		non involved Vehicle (parked)
	Vehicle (parked)		Label of Participant A and B (necessary for mapping of the participants in the database)
	standing Vehicle (in traffic)		Pedestrian
	stopping Vehicle (traffic jam)		Bicycle
W	Vehicle have to wait / stop		Sight Obstruction

Abbildung A-9-171: Legende zum Unfalltypen-Katalog [25]

Anhang E: Glossar der IGLAD-Parameter

Begriff	Erklärungen/Definitionen
Accident (ACCIDENT)	
Accident number (CASENR)	Einmalig vergebene Nummer für einen Unfall. Setzt sich aus der Form „[yy][XX][0000]“ zusammen. [yy] beschreibt das Jahr der Datenfreigabe, [XX] bezeichnet das Herkunftsland und [0000] stellt die fortlaufende Unfallnummer dar.
Accident type (ACCTYPE)	Beschreibt den Unfalltyp nach dem Katalog von HUK aus dem Jahr 1977. „MGCode“ beschreibt den einstelligen und „SGCode“ beschreibt den zweistelligen Unfalltyp.
Country (COUNTRY)	Land in dem der Unfall stattgefunden hat.
GPS latitude/longitude (GPSLAT/LONG)	GPS-Koordinaten nach WGS84, diese werden als GPSLAT und GPSLONG angegeben.
Road condition (ROADCOND)	Fahrbahnzustand beim Unfallzeitpunkt. Dabei werden sechs Zustände unterschieden: dry, wet, glare ice or glazed frost, slippery, other und unknown.
Participant (PARTICIPANT)	
Participant number (PARTNR)	Einmalig vergebene Nummer für einen Unfallbeteiligten. Setzt sich aus der Accident Number und einer fortlaufenden Nummer zusammen
Participant type (PARTTYPE)	Art des Unfallbeteiligten. Grundsätzlich können Fahrzeuge und Fußgänger unterschieden werden. Beispiele hierfür sind pedestrians, motorized two-wheeler, truck und passenger car.
Vehicle make (VEHMAKE)	Hersteller des Fahrzeugs
Vehicle model (MODEL)	Name des Fahrzeugmodells
Registration year (REGYEAR)	Jahr der Erstzulassung. Ist diese unbekannt wird das Jahr angegeben, in dem das Modell erschienen ist.
Vehicle engine power (ENGPPOWER)	Leistung des Fahrzeugmotors laut Zulassungsbescheinigung in kW.

Vehicle mass (VEHMASS)	<p>Fahrzeugmasse in kg, entspricht dem Leergewicht des Fahrzeugs. Bei Personenkraftwagen sowie einspurige Kraftfahrzeuge wird auf das Leergewicht die Masse des Inhalts eines vollen Tanks addiert. Bei Lastkraftwagen ist die Masse von 75 kg für den Fahrer im Leergewicht inkludiert.</p>
Primary collision – CDC/TDC Force Direction (CDC-DIRE)	<p>Codierung der Wirkungslinie der Stoßkraft, auch principal direction of force (PDOF) genannt, die den Schaden am Fahrzeug verursacht hat. Die Richtung der Wirkungslinie ist ident mit der Richtung der Änderung des Moments. Die Winkelunterteilung erfolgt in 30° Schritten, wobei die Angaben der einzelnen Bereiche mittels Uhrzeitangaben erfolgen. Abhängig vom Unfallbeteiligten ist dieser Parameter als CDC1DIRE oder CDC2DIRE hinterlegt/gespeichert. Abbildung A-9-172 stellt die Codierung bezogen auf das Referenzfahrzeug dar.</p>
Primary collision – CDC/TDC Area of Deformation (CDC-AREA)	<p>Dieser Parameter beschreibt den Hauptdeformationsbereich des Fahrzeugs, siehe Abbildung A-9-173. Es wird zwischen front, right side, back, left side, top, undercarriage, not applicable sowie unknown unterschieden. Je nach Unfallbeteiligten wird dieser Parameter als CDC1AREA oder CDC2AREA angegeben.</p>
Primary collision - CDC/TDC Specific longitudinal or lateral area (CDC-LONG)	<p>Dieser Parameter beschreibt die horizontale Lage des Unfallschadens am Fahrzeug. Die Einteilung der Areale ist in Abbildung A-9-175 ersichtlich. Je nach Unfallbeteiligten wird dieser Parameter als CDC1LONG oder CDC2LONG angegeben.</p>
Primary collision - delta angle (DEFANG)	<p>Delta angle in Grad bezeichnet die Differenz zwischen Ein- und Auslaufwinkel. Es wird ein mathematisch positiver Drehsinn angenommen. Ein Beispiel ist in Abbildung A-9-174 dargestellt. Je nach Unfallbeteiligten wird dieser Parameter als DEFANG1 oder DEFANG2 angegeben.</p>
Primary collision – mean deceleration (DECEL)	<p>Dieser Parameter ist als mittlere Verzögerung in $m/s^2 \cdot 10$ vor der Kollision definiert. Sofern das Fahrzeug vor dem Aufprall beschleunigt hat ist der Wert negativ. Ausgangspunkt sollte der Punkt sein, an dem eine kritische Situation eintritt. Je nach Unfallbeteiligten wird dieser Parameter als DECEL1 oder DECEL2 angegeben.</p>

<p>Primary collision – deceleration distance (DECDIST)</p>	<p>Dieser Parameter ist definiert als Weg in m * 10, der von Beginn der Bremsung bis zur Kollision zurückgelegt wird. Je nach Unfallbeteiligten wird dieser Parameter als DECDIST1 oder DECDIST2 angegeben.</p>
<p>Primary collision – driving speed (INISPEED)</p>	<p>Dieser Parameter ist die Fahrzeuggeschwindigkeit in km/h welche vor dem Erkennen der kritischen Situation vorlag. Diese Geschwindigkeit ist ident mit der Geschwindigkeit, bei der eine Reaktion stattgefunden hat beziehungsweise die Geschwindigkeit zum Zeitpunkt des Bremsbeginns. Je nach Unfallbeteiligten wird dieser Parameter als INISPEED1 oder INISPEED2 angegeben.</p>
<p>Primary collision – collision speed (COLSPEED)</p>	<p>Dieser Parameter gibt die Geschwindigkeit des Fahrzeugs zum Zeitpunkt der Kollision in km/h an. Je nach Unfallbeteiligten wird dieser Parameter als COLSPEED1 oder COLSPEED2 angegeben.</p>
<p>Primary collision - delta-v (DELTAV)</p>	<p>Delta-v (in km/h) berechnet sich aus der Differenz der Geschwindigkeitsvektoren vor und nach dem Crash. Die Ermittlung von delta-v ist in Abbildung A-9-176 dargestellt. Je nach Unfallbeteiligten wird dieser Parameter als DELTAV1 oder DELTAV2 angegeben.</p>
<p>Primary collision – EES (EES)</p>	<p>Der EES wird aus dem Energieerhaltungssatz berechnet und in km/h angegeben. Je nach Unfallbeteiligten wird dieser Parameter als EES1 oder EES2 angegeben.</p>
<p>Quelle: J. G. S. F. H. Ines, IGLAD-Codebook Phase 3, IGLAD, 2018</p>	

Abbildungen zu den Erklärungen/Definitionen

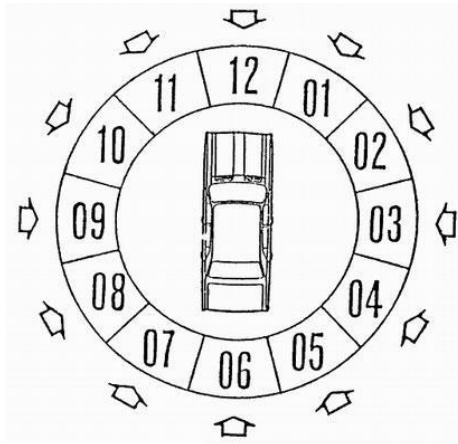


Abbildung A-9-172: Einteilung der principal direction of force [25]

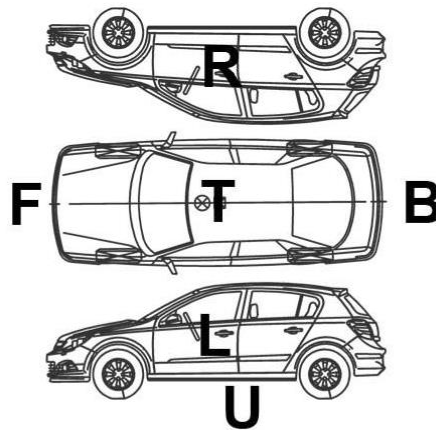


Abbildung A-9-173: Hauptdeformationsbereich des Fahrzeugs [25]

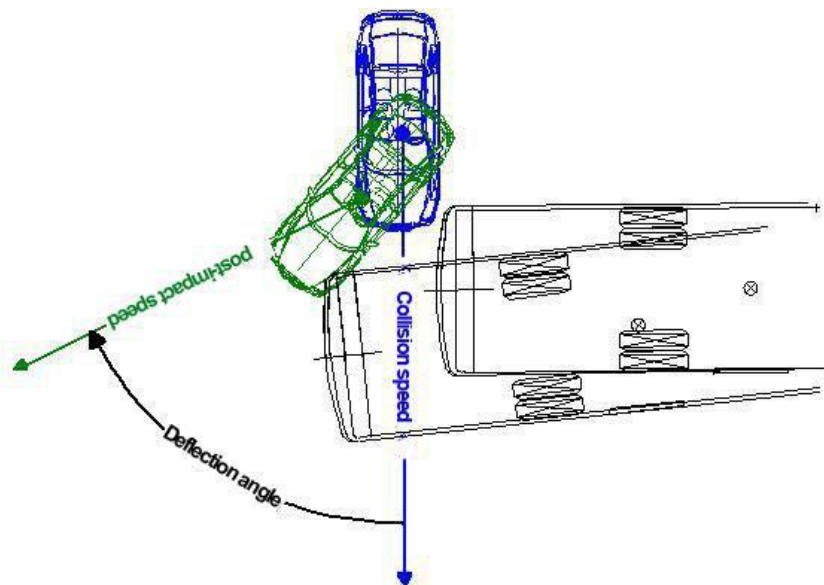


Abbildung A-9-174: Stoßbedingte Winkeländerung (delta angle) [25]

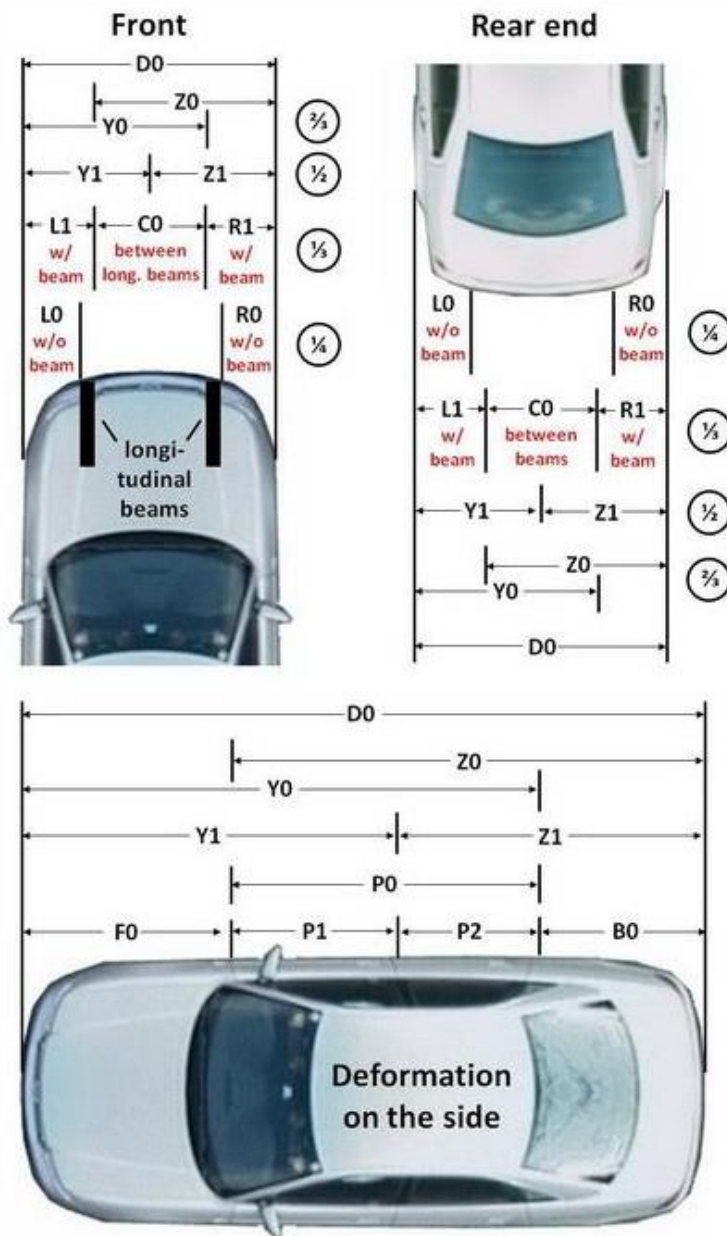


Abbildung A-9-175: Horizontale Lage des Unfallschadens [25]

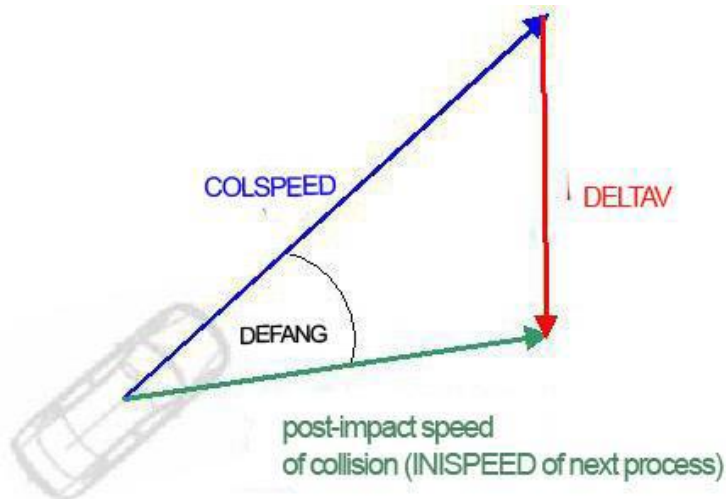


Abbildung A-9-176: Ermittlung der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung delta-v [25]