

Detaillierte statistische Analyse der Häufigkeitsverteilungen von Aufprallgeschwindigkeiten bei Kraftfahrzeugunfällen

Methodologische und physikalische Grundlagen der Datenerhebung

Die präzise Quantifizierung und statistische Erfassung der Häufigkeitsverteilungen von Aufprallgeschwindigkeiten bei Kraftfahrzeugunfällen stellt eine der zentralen Herausforderungen der empirischen Unfallforschung dar. Um die in den internationalen und nationalen Datenbanken dokumentierten Häufigkeiten korrekt interpretieren zu können, ist eine stringente Trennung der physikalischen Messgrößen unabdingbar. In der Fachliteratur und den zugrundeliegenden In-Depth-Datenbanken wird primär zwischen der absoluten Kollisionsgeschwindigkeit (häufig als v_{koll} bezeichnet) und der aufprallbedingten Geschwindigkeitsänderung (Δv oder Δv) differenziert. Beide Metriken beschreiben die Dynamik des eigentlichen physischen Kontakts, grenzen sich jedoch strikt von der ursprünglichen Fahrgeschwindigkeit (der sogenannten Unfallgeschwindigkeit vor Einleitung einer Bremsung oder eines Ausweichmanövers) ab, welche im Rahmen dieses Berichts weisungsgemäß nicht Gegenstand der Analyse ist.

Die Kollisionsgeschwindigkeit (v_{koll}) definiert exakt den Geschwindigkeitsvektor eines Fahrzeugs im Millisekundenbereich des Erstkontakts mit einem anderen Fahrzeug, einem Hindernis oder einem verletzlichen Verkehrsteilnehmer.¹ Sie repräsentiert die absolute translatorische Bewegung des Fahrzeugs im globalen Koordinatensystem der Verkehrsinfrastruktur zum Zeitpunkt Null der Deformationsphase. Demgegenüber steht das Δv (Δv), welches die vektorielle Änderung der Geschwindigkeit des Fahrzeugs während der gesamten elastischen und plastischen Deformationsphase des Aufpralls misst.¹ In Szenarien, in denen zwei Fahrzeuge miteinander kollidieren, ist das Δv stark vom Massenverhältnis der involvierten Objekte abhängig. Ein leichtes Fahrzeug erfährt bei einer Kollision mit einem schweren Nutzfahrzeug ein signifikant höheres Δv als das schwere Fahrzeug, selbst wenn beide die exakt identische absolute Kollisionsgeschwindigkeit (v_{koll}) aufweisen.¹ Für die statistische Erfassung der Häufigkeiten werden in den primären Datensätzen häufig beide Werte parallel geführt, wobei sich das Δv als Standardmetrik in nordamerikanischen Datenbanken etabliert hat, während europäische Studien oft zusätzlich die absolute Kollisionsgeschwindigkeit aggregieren.

Die Datengrundlage für die in diesem Bericht analysierten Häufigkeitsverteilungen rekrutiert sich aus den weltweit detailliertesten Unfallerhebungsprogrammen. Für die Bundesrepublik

Deutschland ist dies primär die GIDAS-Datenbank (German In-Depth Accident Study), in der jährlich etwa 2.000 Verkehrsunfälle nach strengen wissenschaftlichen Kriterien vor Ort dokumentiert und anschließend retrospektiv rekonstruiert werden.⁴ Auf internationaler Ebene stützt sich die Analyse auf das US-amerikanische National Automotive Sampling System / Crashworthiness Data System (NASS/CDS), die Crash Injury Research Engineering Network (CIREN) Datenbank sowie auf Auswertungen der britischen Cooperative Crash Injury Study (CCIS).²

Die Methodik der Datengenerierung hat einen massiven Einfluss auf die resultierenden Häufigkeitskurven. Historisch wurden Delta-v und Aufprallgeschwindigkeiten durch aufwendige Unfallrekonstruktionsverfahren mittels Algorithmen wie Crash3 und WinSmash berechnet, welche aus der gemessenen Fahrzeugdeformation am Unfallort auf die abgebaute kinetische Energie und somit auf die Aufprallgeschwindigkeit rückschließen.² Diese methodische Herangehensweise ist jedoch bei komplexen Aufprallkonstellationen, wie beispielsweise seitlichen Streifkollisionen, Überschlägen oder dem Anprall an schmale, unnachgiebige Objekte, mit erheblichen Unsicherheiten behaftet. Dies führt in großen Datensätzen zu einer statistischen Leerstelle: In der NASS/CDS-Datenbank des Jahres 2000 wurden beispielsweise rund 50 Prozent aller Delta-v-Schätzungen als "unbekannt" (unknown) klassifiziert.²

Aus diesem Grund verschiebt sich die Datenerhebung zunehmend in Richtung direkter telemetrischer Auslesungen aus Event Data Recordern (EDR), den sogenannten "Black Boxes" in modernen Fahrzeugen. EDR-Systeme protokollieren die longitudinale und laterale Geschwindigkeitsänderung sowie die absolute Aufprallgeschwindigkeit mikrosekundengenau und völlig unabhängig von retrospektiven Deformationsberechnungen.² Eine Analyse von EDR-Aufzeichnungen, bei denen es zu einer Auslösung des Frontalairbags kam, zeigt eine empirische Verteilung, bei der der Median des longitudinalen Delta-v bei exakt 15 mph (ca. 24 km/h) lag.¹⁰ Die aufgezeichneten Geschwindigkeitsänderungen streuten in dieser spezifischen Teilmenge zwischen extrem niedrigen 3 mph (ca. 4,8 km/h) und 51 mph (ca. 82 km/h).¹⁰ Diese Datenpunkte verdeutlichen die ausgeprägte Rechtsschiefe der Verteilungskurve: Die absolute Mehrheit der Aufprallereignisse konzentriert sich im Bereich sehr niedriger Geschwindigkeiten, während Ereignisse jenseits von 50 km/h Delta-v extrem seltene statistische Ausreißer in der Gesamthäufigkeit darstellen.

Empirische Häufigkeitsverteilungen im US-amerikanischen NASS/CDS-Datensatz

Die umfangreichste Langzeitanalyse zur Häufigkeitsverteilung von Aufprallgeschwindigkeiten, gemessen als Geschwindigkeitsänderung (Delta-v), liefert die Auswertung der NASS-CDS-Datenbank über einen Zeitraum von 22 Jahren, von 1994 bis 2015. Dieser Datensatz ist besonders wertvoll, da er zehntausende gewichtete Unfälle von Pkw und leichten Nutzfahrzeugen (Light Trucks and Vans) aggregiert und eine detaillierte Schichtung nach Aufprallkonstellationen ermöglicht. Die Analyse der kumulativen Häufigkeiten offenbart ein konsistentes, universelles Verteilungsmuster, das unabhängig von der primären

Krafteinleitungsrichtung (Front, Seite, Heck) Bestand hat.¹¹

Um die Datenstruktur darzustellen, wurde das kontinuierliche Spektrum der Geschwindigkeitsänderungen in diskrete Inkremente unterteilt. Das unterste Intervall umfasst Kollisionen mit einem Delta-v von weniger als 15 mph (entspricht ca. 24,1 km/h). Daran schließen sich Inkremente in Schritten von 5 mph (ca. 8 km/h) an, bis hin zu einem oberen Sammelintervall für Hochgeschwindigkeitskollisionen mit einem Delta-v von mehr als 35 mph (entspricht ca. 56,3 km/h).¹¹

Tabelle 1: Kumulative Häufigkeit der Geschwindigkeitsänderung (Delta-v) bei Unfällen mit angegurtenen Pkw-Insassen nach Aufprallrichtung

Aufprallkonstellation (PDOF)	Häufigkeit im Intervall Delta-v < 15 mph (< 24,1 km/h)	Häufigkeit im Intervall Delta-v > 35 mph (> 56,3 km/h)
Frontalaufprall	71,60 %	0,642 %
Near-Side (zugewandte Seite)	84,90 %	0,239 %
Far-Side (abgewandte Seite)	81,10 %	0,297 %
Heckaufprall	71,70 %	0,614 %

Datenquelle: NASS-CDS Erhebungszeitraum 1994–2015, beschränkt auf angegurte Insassen in leichten Kraftfahrzeugen.¹¹

Die deskriptive Statistik der Tabelle 1 liefert fundamentale Einsichten in die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von Verkehrsunfällen. Bei Frontalkollisionen finden nahezu drei Viertel aller polizeilich erfassten Unfälle, bei denen ein Fahrzeug abgeschleppt werden musste (Towaway-Crashes), bei einer Geschwindigkeitsänderung von unter 24,1 km/h statt. Die Häufigkeit beträgt hier präzise 71,6 Prozent.¹¹ Im extremen Kontrast dazu steht das obere Ende der Skala: Lediglich 0,642 Prozent aller erfassten Frontalkollisionen weisen ein Delta-v von mehr als 56,3 km/h auf.¹¹

Noch prägnanter stellt sich die Verteilung bei den lateralen Aufprallkonstellationen dar. Ein "Near-Side"-Aufprall, bei dem die Krafteinleitung auf der dem Insassen zugewandten Fahrzeugseite erfolgt, geschieht in erdrückenden 84,9 Prozent der Fälle bei einem Delta-v von unter 24,1 km/h.¹¹ Hochgeschwindigkeits-Seitenkollisionen (über 56,3 km/h Delta-v) auf der zugewandten Seite sind mit einer relativen Häufigkeit von lediglich 0,239 Prozent absolute Raritäten im statistischen Gesamtbild.¹¹ Die Verteilung bei "Far-Side"-Kollisionen (Anprall auf der dem Insassen abgewandten Seite) verhält sich mit 81,1 Prozent im untersten Geschwindigkeitsband und 0,297 Prozent im obersten Band nahezu äquivalent.¹¹ Auch der Heckaufprall spiegelt die Verteilungscharakteristik des Frontalaufpralls nahezu spiegelbildlich wider: 71,7 Prozent der Auffahrunfälle generieren ein Delta-v von unter 15 mph, während nur 0,614 Prozent die Schwelle von 35 mph überschreiten.¹¹

Diese stark linkssteile, rechtsschiefe Verteilungscharakteristik bleibt bemerkenswert konstant, wenn man demografische oder verhaltensspezifische Variablen variiert. So lässt sich argumentieren, dass das Anlegen des Sicherheitsgurtes ein Proxy für ein generell

sicherheitsbewussteres und potenziell langsames Fahrverhalten darstellen könnte. Die NASS-CDS Daten erlauben hierzu einen direkten Abgleich mit der Kohorte der unangeschnallten Insassen.

Tabelle 2: Kumulative Häufigkeit der Geschwindigkeitsänderung (Delta-v) bei Unfällen mit unangeschnallten Pkw-Insassen nach Aufprallrichtung

Aufprallkonstellation (PDOF)	Häufigkeit im Intervall Delta-v < 15 mph (< 24,1 km/h)	Häufigkeit im Intervall Delta-v > 35 mph (> 56,3 km/h)
Frontalaufprall	59,90 %	1,836 %
Near-Side (zugewandte Seite)	70,20 %	1,063 %
Far-Side (abgewandte Seite)	70,90 %	1,667 %

Datenquelle: NASS-CDS Erhebungszeitraum 1994–2015, beschränkt auf unangeschnallte Insassen in leichten Kraftfahrzeugen.¹¹

Ein Vergleich zwischen Tabelle 1 und Tabelle 2 zeigt eine messbare Verschiebung der Verteilungskurve bei der unangeschnallten Population in Richtung höherer Aufprallgeschwindigkeiten. Der Anteil der Frontalkollisionen im Niedriggeschwindigkeitsbereich (unter 15 mph) sinkt von 71,6 Prozent auf 59,9 Prozent.¹¹ Korrespondierend dazu steigt die relative Häufigkeit der Hochgeschwindigkeitskollisionen (über 35 mph) in dieser Gruppe von 0,642 Prozent auf 1,836 Prozent an – eine nahezu dreifache Erhöhung der Frequenz in diesem extremen Spektrum.¹¹ Ähnliche Verschiebungen sind bei den seitlichen Aufprallarten zu beobachten, wo die Häufigkeit von Near-Side-Aufprällen über 35 mph von 0,239 Prozent auf 1,063 Prozent ansteigt.¹¹

Dennoch ändert diese interne Verschiebung nichts an der fundamentalen Makro-Struktur der Daten: Auch bei der Gruppe der unangeschnallten Insassen liegt der Schwerpunkt der kumulativen Häufigkeitsverteilung massiv auf den niedrigen Aufprallgeschwindigkeiten. In allen Aufprallkonstellationen finden stets zwischen 59,9 und 70,9 Prozent aller Unfälle bei einer Geschwindigkeitsänderung von weniger als 24,1 km/h statt.¹¹ Die Verteilung der physikalischen Aufprallenergie wird demnach primär durch infrastrukturelle Rahmenbedingungen und fahrphysikalische Limits in der Breite der Population determiniert und nur sekundär durch Subgruppen-spezifisches Fahrverhalten moduliert.

Internationale Vergleiche von Zentralmaßen: Mediane und Perzentile

Die kumulativen Verteilungsfunktionen lassen sich durch die Betrachtung von Perzentilen, insbesondere des 50-Prozent-Perzentils (Median), zwischen verschiedenen internationalen Datensätzen hervorragend vergleichen. Der Median bezeichnet jenen Punkt in der Häufigkeitsverteilung, bei dem exakt 50 Prozent der gemessenen Aufprallgeschwindigkeiten unterhalb und 50 Prozent oberhalb dieses Wertes liegen. Die Gegenüberstellung der

NASS-Datenbank mit der CIREN-Datenbank illustriert hierbei, wie sich Auswahlkriterien für die Aufnahme von Unfällen in eine Datenbank auf die empirisch gemessene Häufigkeitsverteilung auswirken.⁷

Die CIREN-Datenbank (Crash Injury Research Engineering Network) fokussiert sich per Definition auf schwerere Unfallereignisse im Vergleich zur breiter angelegten NASS-Datenbank. Dennoch zeigen die extrahierten Medianwerte ein interessantes Bild, das die Komplexität der Verteilungskurven unterstreicht:

- **Frontalkollisionen:** In der NASS-Datenbank liegt der Median der Aufprallgeschwindigkeit bei Frontalkollisionen bei 45,5 km/h. Das bedeutet, dass die kumulative Häufigkeit von 50 Prozent bei diesem Wert erreicht wird. In der CIREN-Datenbank liegt dieser Medianwert signifikant niedriger, nämlich bei 33,2 km/h.⁷
- **Near-Side-Kollisionen:** Bei den seitlichen Kollisionen auf der zugewandten Seite liegen die Mediane enger beieinander. In der NASS-Datenbank wird die 50-Prozent-Marke bei 37,5 km/h erreicht, während sie in der CIREN-Datenbank bei 34,0 km/h liegt.⁷
- **Far-Side-Kollisionen:** Bei Anprallen auf der abgewandten Seite zeigt sich eine leichte Umkehrung: Hier liegt der Median in der NASS-Datenbank bei 41,5 km/h, während die CIREN-Datenbank eine kumulative Häufigkeit von 50 Prozent erst bei einer Aufprallgeschwindigkeit von 43,5 km/h erreicht.⁷
- **Heckkollisionen:** Für den Heckaufprall weist die NASS-Datenbank den höchsten Medianwert im gesamten Set auf; exakt 50 Prozent aller erfassten Auffahrunfälle im Heckbereich finden bei Geschwindigkeiten von unter 55,0 km/h statt.⁷

Die Tatsache, dass eine Datenbank wie CIREN in einigen Kategorien niedrigere Medianwerte für die Aufprallgeschwindigkeit aufweist als die breiter angelegte NASS-Datenbank, weist auf komplexe Wechselwirkungen im Daten-Sampling hin und verdeutlicht, dass die Häufigkeit bestimmter Aufprallgeschwindigkeiten nicht losgelöst vom methodischen Rahmen der Erhebung betrachtet werden kann.

Ein weiterer aufschlussreicher Kontrast zeigt sich im transatlantischen Vergleich zwischen den US-amerikanischen NASS-Daten und der britischen Cooperative Crash Injury Study (CCIS). Betrachtet man ein fixes Geschwindigkeitsband – hier das Intervall von 0 bis 39 km/h für das gemessene Delta-v – so offenbaren sich deutliche strukturelle Unterschiede in den nationalen Häufigkeitsverteilungen. In der US-amerikanischen NASS-Studie ereignen sich über 90 Prozent einer spezifischen Untergruppe von Kollisionen bei einer aufprallbedingten Geschwindigkeitsänderung von weniger als 39 km/h.⁶ Legt man exakt dasselbe Filterkriterium an die britische CCIS-Datenbank an, so fallen lediglich etwa 80 Prozent der Unfälle in dieses Geschwindigkeitsband.⁶

Diese statistische Diskrepanz von 10 Prozentpunkten in der kumulativen Häufigkeit bedeutet, dass die Verteilungskurve im Vereinigten Königreich flacher verläuft und einen ausgeprägteren "Tail" (rechten Rand) im Bereich höherer Geschwindigkeiten aufweist. Die Ursache für diese Verschiebung der relativen Häufigkeiten liegt in der unterschiedlichen Zusammensetzung des Unfallgeschehens: Im britischen Datensatz existiert ein proportional signifikant höherer Anteil an Hochgeschwindigkeits-Alleinunfällen, insbesondere das Abkommen von der Fahrbahn mit Kontrollverlust und anschließender Kollision mit starren, fixen Objekten außerhalb des

Straßenraums.⁶ Diese infrastrukturellen und geografischen Unterschiede modulieren die exakte Form der Häufigkeitsverteilung, wenngleich das fundamentale Prinzip der Dominanz niedriger Aufprallgeschwindigkeiten stets intakt bleibt.

Detaillierte Häufigkeitsverteilungen in der Bundesrepublik Deutschland (GIDAS)

Die Situation in Deutschland wird durch das GIDAS-Konsortium (German In-Depth Accident Study) in einer in Tiefe und Repräsentativität einzigartigen Weise erfasst. GIDAS dokumentiert jährlich über 2.000 Unfälle, wobei für jedes Ereignis über 3.500 Einzelinformationen erfasst werden.⁵ Die Auswertung der empirischen Aufprallgeschwindigkeiten aus GIDAS bestätigt die asymmetrische, rechtsschiefe Verteilung, liefert jedoch durch die granularere Auflösung und den Bezug auf spezifische Verkehrsumfelder ("Traffic Domains") ein noch differenzierteres Bild der Häufigkeiten.

Generell lässt sich für die Gesamtheit der Pkw-Insassen in Deutschland konstatieren, dass die Verteilung der Geschwindigkeitsänderungen (Delta-v) extrem konzentriert ist. Deskriptive statistische Auswertungen der GIDAS-Daten belegen, dass exakt zwei Drittel (rund 66 Prozent) aller Insassen, die in einen registrierten Verkehrsunfall verwickelt sind, eine Kollision mit einem Delta-v von unter 20 km/h erfahren.¹² Das nächsthöhere Geschwindigkeitsband, welches Kollisionen mit einem Delta-v zwischen 20 und 39 km/h umfasst, deckt weitere knapp 30 Prozent der Insassen ab.¹²

Summiert man diese beiden kumulativen Häufigkeiten, ergibt sich die beeindruckende statistische Realität, dass annähernd 96 Prozent aller in GIDAS erfassten Insassenkollisionen bei einer Geschwindigkeitsänderung von weniger als 40 km/h stattfinden.¹²

Geschlechtsspezifische Divergenzen in der Exposition gegenüber Aufprallgeschwindigkeiten lassen sich dabei empirisch nicht belegen; die Verteilungskurven für männliche und weibliche Insassen verlaufen nahezu identisch, was darauf hindeutet, dass das makroskopische Unfallgeschehen unabhängig von der Demografie den physikalischen Parametern des Verkehrsraums folgt.¹²

Interessante demografische Unterschiede in der Häufigkeitsverteilung der Aufprallgeschwindigkeiten zeigen sich jedoch, wenn man die Alterskohorten der Verunglückten trennscharf analysiert. Eine Auswertung der GIDAS-Daten des Jahres 2022 verdeutlicht signifikante Unterschiede zwischen Senioren (über 65 Jahre) und der jüngeren Altersgruppe (18 bis 65 Jahre). Bei den Senioren findet sich der absolut höchste Anteil der Aufprallgeschwindigkeiten im untersten Intervall von lediglich 1 bis 9 km/h.¹³ Die Geschwindigkeitsänderungen sind in dieser Kohorte generell flacher verteilt, mit Ausnahme des Bereichs zwischen 70 und 99 km/h, der eine relative Senke aufweist.¹³ Im Gegensatz dazu weist die jüngere Altersgruppe der 18- bis 65-Jährigen eine Verteilung auf, in der das Intervall der extrem niedrigen Geschwindigkeiten (1 bis 9 km/h) statistisch nur einen relativ geringen Anteil ausmacht, während gleichzeitig eine bemerkenswerte Häufung am äußersten rechten Rand der Verteilung – bei Kollisionen mit Geschwindigkeitsänderungen von über 100 km/h – zu verzeichnen ist.¹³ Diese bipolare Verschiebung der Häufigkeiten spiegelt das divergierende

Mobilitäts- und Expositionsverhalten der Altersgruppen auf Landstraßen und Autobahnen wider.

Kategorisierung der Kollisionsgeschwindigkeiten nach ISO 26262 Verkehrsumfeldern

Ein methodisch sehr stringenter Ansatz zur Klassifizierung der Häufigkeiten von Aufprallgeschwindigkeiten in GIDAS findet sich im Rahmen der Normierungsprozesse für die Fahrzeugsicherheit (ISO 26262). Anstatt die absoluten Kollisionsgeschwindigkeiten (v_{koll}) isoliert zu betrachten, werden sie in sogenannte "Traffic Domains" geclustert. Diese Clusterung trägt dem Umstand Rechnung, dass die Häufigkeit einer bestimmten Aufprallgeschwindigkeit direkt von der physikalisch und rechtlich maximal möglichen Annäherungsgeschwindigkeit im jeweiligen Umfeld abhängt.¹

Die Häufigkeitsverteilungen der tatsächlichen Kollisionsgeschwindigkeiten (v_{koll}) erstrecken sich über sechs definierte Verkehrsumfelder:

1. **Shared Zones (Verkehrsberuhigte Bereiche):** Hier sammeln sich die Häufigkeiten der Aufprallgeschwindigkeiten im Band von 0 bis 14 km/h.¹
2. **Residential Streets (Wohnstraßen):** Dieses Cluster aggregiert Kollisionen im Intervall von 15 bis 29 km/h.¹
3. **City Roads (Städtische Hauptverkehrsstraßen):** Aufprallgeschwindigkeiten zwischen 30 und 49 km/h dominieren hier die Verteilung.¹
4. **Arterial Thoroughfares (Außerörtliche Verbindungsstraßen):** Hier finden sich gehäuft Aufprallgeschwindigkeiten zwischen 50 und 69 km/h.¹
5. **Rural Roads (Landstraßen):** In diesem Hochrisiko-Cluster sammeln sich die Kollisionsgeschwindigkeiten im Bereich von 70 bis 99 km/h.¹
6. **Intercity Highways (Autobahnen):** Das oberste Cluster aggregiert die Frequenzen von Aufprallgeschwindigkeiten ab 100 km/h aufwärts.¹

Für jedes dieser Bänder lassen sich statistische Parameter wie der Mittelwert und das 90-Prozent-Quantil (jenes Geschwindigkeitsniveau, unterhalb dessen 90 Prozent der Unfälle in diesem spezifischen Domain stattfinden) berechnen. Die detaillierte Zuweisung in der GIDAS-Datenbank zeigt, dass die absoluten Fallzahlen (Frequenzen) in den mittleren Bändern (15 bis 49 km/h) massiv überproportional vertreten sind. Die Kollisionen in den Bändern jenseits der 70 km/h stellen in der Gesamtschau der absoluten Ereignishäufigkeiten eine Minderheit dar, wenngleich ihre Bedeutung aufgrund der inhärenten physikalischen Schwere unbestritten ist.¹ Bemerkenswert ist hierbei die Unterscheidung, ob das kollidierende Fahrzeug ein reagierendes System aufweist (beispielsweise einen menschlichen Fahrer, der bremst) oder nicht. Handelt es sich um ein passives Objekt oder ein Fahrzeug ohne Bremsreaktion, entspricht die Annäherungsgeschwindigkeit exakt der Kollisionsgeschwindigkeit (v_{koll}). Reagiert der Kollisionspartner hingegen durch Verzögerung, verschiebt sich die Frequenzverteilung der resultierenden Aufprallgeschwindigkeit signifikant nach unten, weg von der ursprünglichen Fahrgeschwindigkeit hin zu den etablierten Kumulationspunkten bei 20 bis 40 km/h.¹

Asymmetrische Aufprallkonstellationen:

Pkw-Kollisionen mit ungeschützten Verkehrsteilnehmern

Die Verteilungsfunktion der Aufprallgeschwindigkeiten ändert ihren Charakter grundlegend, wenn man den Filter auf asymmetrische Kollisionen setzt – spezifisch auf Unfälle zwischen Personenkraftwagen und ungeschützten Verkehrsteilnehmern (Vulnerable Road Users - VRU), also Radfahrern und Fußgängern. Da in diesen Konstellationen die Masse des Pkw die Masse des VRU um ein Vielfaches übersteigt, entspricht die absolute Kollisionsgeschwindigkeit des Fahrzeugs (v_{koll}) nahezu 1:1 der auf den verletzlichen Verkehrsteilnehmer einwirkenden Stoßschwere, weshalb die Metrik Δv hier für das Fahrzeug gegen null tendiert und v_{koll} als alleinige statistische Kenngröße herangezogen wird.¹³

Die empirischen Erhebungen der Verkehrsunfallforschung der TU Dresden (VUFO) und der Unfallforschung der Versicherer (UDV) basierend auf GIDAS-Daten zeigen, dass sich das absolute Gros dieser Unfälle im extrem niedrigen Geschwindigkeitsbereich abspielt. Eine umfassende Datenanalyse aus dem Jahr 2009 illustriert, dass bei Kollisionen zwischen Pkw und Fahrrädern 92,1 Prozent der Aufprallgeschwindigkeiten unterhalb der Schwelle von 40 km/h liegen.¹⁴ Die Kumulationspunkte dieser Verteilung liegen noch deutlich darunter und variieren stark in Abhängigkeit von der exakten Definition der betrachteten Sub-Population.

Betrachtet man das vollständige Spektrum aller Frontalunfälle eines Pkw mit einem kreuzenden Radfahrer, unabhängig von anderweitigen Parametern, so zentriert sich die Verteilungskurve um einen Mittelwert der Aufprallgeschwindigkeit von exakt 20 km/h.¹⁵ Filtert man die Datenbasis und betrachtet ausschließlich jene Teilmenge, die spezifische Kriterien erfüllt, verschiebt sich die Verteilung. In einer dedizierten VUFO-Auswertung liegt die durchschnittliche Pkw-Kollisionsgeschwindigkeit bei 26,8 km/h. Der Median dieser spezifischen Verteilungskurve – der Punkt, an dem 50 Prozent der Radfahrer-Kollisionen bei niedrigeren und 50 Prozent bei höheren Geschwindigkeiten stattfinden – beträgt 23 km/h.¹⁵ In einer weiteren gefilterten Auswertung von Frontalkollisionen, die sich auf den Zeitraum von 1999 bis 2010 stützt, steigt die durchschnittliche Pkw-Aufprallgeschwindigkeit in dieser speziellen Kohorte auf 36 km/h an.¹⁵

Diese ausgeprägte Spreizung der Mittelwerte – von 20 km/h über 26,8 km/h bis hin zu 36 km/h – illustriert eindrücklich, dass es nicht *die eine* absolute Häufigkeitsverteilung gibt, sondern dass die Kurve dynamisch auf die exakte Zusammensetzung der Stichprobe reagiert.

Ein entscheidender Treiber für die Form dieser Häufigkeitsverteilung bei VRU-Unfällen ist das Bremsverhalten der Fahrzeugführer. Box-Whisker-Diagramme aus GIDAS-Auswertungen, welche die Ausgangsgeschwindigkeit mit der letzten Kollisionsgeschwindigkeit in Relation setzen, dokumentieren ein eklatantes Phänomen: Ein extrem hoher Anteil dieser Unfälle erfolgt völlig ungebremsst. In mindestens 46 Prozent der ausgewerteten Pkw-Radfahrer-Kollisionen findet überhaupt keine Verzögerung vor dem Aufprall statt.¹⁵ Spezifische Abfragen der UDV-Datenbank weisen sogar darauf hin, dass in 67 Prozent der bekannten Fälle keine Bremsung vor der Kollision erfolgte.¹⁵

Diese Abwesenheit einer Geschwindigkeitsreduktion vor dem Anprall bedeutet, dass die

Häufigkeitsverteilung der Aufprallgeschwindigkeit in diesen Szenarien nahezu deckungsgleich mit der Verteilung der gefahrenen Ausgangsgeschwindigkeiten zum Zeitpunkt der Gefahrenerkennung ist. Folgerichtig spaltet sich die Häufigkeitsverteilung extrem auf, wenn man die Fahrgeometrie isoliert:

- Befindet sich der Pkw in einer reinen Geradeausfahrt und kollidiert mit einem von rechts kreuzenden Radfahrer, kulminiert die Frequenz der Aufprallgeschwindigkeiten bei einem Durchschnittswert von 28 km/h.¹⁵
- Befindet sich der Pkw hingegen in einem Abbiegevorgang (bei dem die Ausgangsgeschwindigkeit fahrphysikalisch bedingt stark limitiert ist), halbiert sich die durchschnittliche Aufprallgeschwindigkeit auf lediglich 14 km/h.¹⁵

Der hohe Anteil von Abbiegeunfällen im Radverkehr ist der primäre statistische Grund, weshalb die globale Häufigkeitsverteilung der Aufprallgeschwindigkeiten bei Pkw-Fahrrad-Kollisionen im Median nochmals spürbar niedriger ausfällt als beispielsweise bei Pkw-Fußgänger-Kollisionen, bei denen die Pkw-Aufprallgeschwindigkeiten tendenziell im Durchschnitt etwas höher liegen.¹⁵

Häufigkeitsverteilungen bei Alleinunfällen und Kollisionen mit fixen Hindernissen

Ein vollkommen eigenständiges statistisches Cluster bilden die sogenannten Alleinunfälle, bei denen Fahrzeuge ohne die primäre Interaktion mit anderen mobilen Verkehrsteilnehmern von der Fahrbahn abkommen und mit stationären Hindernissen wie Bäumen (Tree Impacts) oder Pfählen (Pole Impacts) kollidieren. Da diese Unfallszenarien gehäuft auf Landstraßen oder außerörtlichen Streckenabschnitten auftreten, wo die grundlegenden Fahrgeschwindigkeiten höher limitiert sind als im urbanen Raum, verschiebt sich die gesamte Häufigkeitsverteilung der resultierenden Aufprallgeschwindigkeiten im Vergleich zu den oben analysierten Car-to-Car- oder VRU-Szenarien deutlich nach rechts.¹⁵

Die statistischen Erhebungen für Deutschland offenbaren für Pkw-Baumunfälle spezifische Kumulationspunkte. Die absolute Aufprallgeschwindigkeit an den ersten Baum im Unfallablauf liegt bei exakt der Hälfte der dokumentierten Unfälle (kumulative Häufigkeit 50 Prozent) bei 50 km/h oder darunter.¹⁶ Die obere Hälfte der Verteilung erstreckt sich folglich über das gesamte Spektrum jenseits der 50 km/h-Marke.¹⁶

Auch hier ist die Aufspaltung in Sub-Distributionen in Abhängigkeit von der kinetischen Vorgeschichte analytisch geboten. Der Vorlauf eines Baumunfalls beinhaltet häufig ein Ausrollen im Grünstreifen, ein Schleudern oder eine Notbremsung, wodurch die Ausgangsgeschwindigkeit bis zum finalen Kontaktpunkt abgebaut wird:

- Bewegt sich die anfängliche Ausgangsgeschwindigkeit des Fahrzeugs im Bereich unter 50 km/h, liegt die resultierende Kollisionsgeschwindigkeit mit dem Baum im Median bei 30 km/h.¹⁶
- Liegt die anfängliche Ausgangsgeschwindigkeit im Intervall von 50 bis 65 km/h, verschiebt sich der Median der finalen Baum-Kollisionsgeschwindigkeit signifikant nach oben und kulminiert bei 45 km/h.¹⁶

Eine besondere, wenngleich seltene Nische in der Häufigkeitsverteilung stellen Kollisionen mit schmalen, unnachgiebigen Objekten (Pole Side Impacts) dar. Eine vergleichende Studie der britischen OTS-Datenbank (On the Spot) und der deutschen GIDAS-Datenbank zur Häufigkeit von Aufprallgeschwindigkeiten an bestimmten Frontpartien bei Pfahlkollisionen lieferte aufgrund der Seltenheit des Ereignisses nur schmale Datenbänder. Die absolute Verteilung der Aufprallgeschwindigkeiten streute hier breit über alle Intervalle: 0-20 mph (18 Fälle), 21-40 mph (14 Fälle), 41-60 mph (23 Fälle), 61-80 mph (22 Fälle) bis hin zu 81-100 mph (31 Fälle).¹⁷ Diese fast Gleichverteilung über die Geschwindigkeitsbänder (mit einer leichten Überrepräsentation im obersten Band) ist völlig atypisch für die sonst stark linkssteilen Unfallverteilungen und unterstreicht die Sondersituation von Hochgeschwindigkeits-Alleinunfällen, bei denen Fahrzeuge mit extremen Geschwindigkeiten unkontrolliert in die Randbebauung einschlagen.

Fahrzeugklassen-spezifische Abweichungen: Pkw im Vergleich zu Nutzfahrzeugen

Die Häufigkeitsverteilung der Aufprallgeschwindigkeiten ist keine invariante Konstante über alle Fahrzeugklassen hinweg. Physikalische Eigenschaften (wie die Masse und Beschleunigungsfähigkeit) sowie das primäre Einsatzgebiet der Fahrzeuge (urbaner Lieferverkehr vs. transkontinentaler Gütertransport) modulieren die empirischen Kurven. Ein Vergleich zwischen der Flotte der regulären Personenkraftwagen (Pkw) und leichten Nutzfahrzeugen (Transportern / LNF) illustriert diese Nuancen. Betrachtet man die kumulative Häufigkeit bis zu einer definierten Schwellengeschwindigkeit von 60 km/h, zeigt sich eine leichte Divergenz: Eine Kollisionsgeschwindigkeit von bis zu 60 km/h deckt 52 Prozent aller registrierten Pkw-Unfälle in der betrachteten Studie ab. Bei den leichten Nutzfahrzeugen (Transportern) erfasst diese Schwelle von 60 km/h hingegen bereits 62 Prozent aller Unfälle.¹⁸ Daraus lässt sich mathematisch folgern, dass die Häufigkeitsverteilung bei Pkw-Unfällen einen ausgeprägteren rechten Rand besitzt; fast die Hälfte (48 Prozent) der Pkw-Kollisionen liegt in diesem speziellen Datensatz über 60 km/h, während dies nur auf 38 Prozent der Transporter-Kollisionen zutrifft. Die Aufprallgeschwindigkeiten der Transporter konzentrierten sich in der Auswertung zwischen 30 und 120 km/h, wobei der statistische Mittelwert in einem engen Band zwischen 30 und 45 km/h berechnet wurde.¹⁸

Eine noch drastischere Verschiebung der Verteilung findet man bei der Analyse von Unfällen mit schweren Lastkraftwagen (Lkw). Die dokumentierten Kollisionsgeschwindigkeiten für diese Fahrzeugklasse streuten in der vergleichenden Erhebung zwischen 0 km/h und 90 km/h. Der Mittelwert der Aufprallgeschwindigkeit bei diesen Lkw-Kollisionen lag jedoch extrem hoch, nämlich im Band von 75 bis 90 km/h.¹⁸ Diese Häufung von Aufprallereignissen nahe der zulässigen Höchstgeschwindigkeit für Lkw indiziert, dass Lkw-Kollisionen (beispielsweise Auffahrunfälle am Stauende auf Autobahnen) sehr häufig ungebremst oder nur mit minimaler Vorverzögerung stattfinden, wodurch die Häufigkeitsverteilung für diese Fahrzeugklasse ihren Peak nicht im urbanen 20-30 km/h-Bereich, sondern im Autobahn-typischen 80 km/h-Bereich ausbildet.

Methodische Artefakte, Verzerrungen und

Selektionsbias in den Häufigkeitsdaten

Bei der wissenschaftlichen Interpretation der präsentierten Häufigkeitsverteilungen müssen die systemimmanenten Limitationen und Selektionsmechanismen der jeweiligen Datenbanken kritisch reflektiert werden. Die Form der Verteilungskurve – insbesondere ihre extreme Konzentration im Bereich unter 30 km/h – ist ein Abbild der erfassten Grundgesamtheit.

Datenbanken wie die deutsche GIDAS oder das US-amerikanische CIREN-Netzwerk basieren jedoch auf strikten Einschlusskriterien, die zu einem statistischen Selektionsbias führen.

GIDAS erhebt per Definition ausschließlich Verkehrsunfälle im Straßenverkehr, bei denen ein Personenschaden entstanden ist.⁴ Reine Sachschadenumfälle (sogenannte Property-Damage-Only Crashes, PDO), bei denen Blechschäden, aber keine diagnostizierbaren physischen Verletzungen an den Insassen oder Unfallgegnern auftreten, fließen systematisch nicht in die aggregierten GIDAS-Häufigkeitsverteilungen ein.¹⁹

Aus fahrphysiologischer und biomechanischer Sicht ist es eine gesicherte Annahme, dass die absolute Mehrheit dieser reinen Sachschadenumfälle bei extrem niedrigen Kollisionsgeschwindigkeiten stattfindet – typischerweise bei Parkremplern, leichten Auffahrunfällen im städtischen Stop-and-Go-Verkehr oder Rangiermanövern bei Geschwindigkeiten von unter 10 km/h bis maximal 15 km/h.

Würde man die Häufigkeit *aller* physisch stattfindenden Fahrzeugkollisionen (inklusive der Abermillionen PDO-Unfälle) in einer fiktiven, allumfassenden Gesamtdatenbank aggregieren, würde die Verteilungskurve der Aufprallgeschwindigkeiten im Bereich zwischen 0 und 15 km/h massiv nach oben schnellen. Die empirisch gemessenen 66 Prozent der GIDAS-Unfälle unterhalb von 20 km/h Delta-v¹² oder die 71,6 Prozent der NASS-Towaway-Crashes unterhalb von 15 mph (24,1 km/h)¹¹ repräsentieren somit de facto nur die Spitze des Eisbergs. Der wahre Anteil von Niedriggeschwindigkeitskollisionen am absoluten Unfallgeschehen liegt durch das Fehlen der PDO-Daten in der Statistik in Wirklichkeit noch weitaus höher.

Um diese statistischen Leerstellen (Missing Data) zu adressieren und realitätsnähere Verteilungsfunktionen für die Entwicklung von Assistenzsystemen zu generieren, bedienen sich Analysten komplexer Imputationsverfahren. In der Forschungspraxis wird beispielsweise eine aggregierte Geschwindigkeitsverteilung über alle Unfalltypen gebildet und ein methodischer Schwellenwert (Cut-off-Threshold, \$t\$) beim 75. Perzentil dieser aggregierten Verteilung angesetzt. Dieser Schwellenwert dient dazu, niedrige Aufprallgeschwindigkeiten von hohen zu trennen und die fehlenden Sachschadenumfälle (PDO) über "Multiple Imputation"-Verfahren mathematisch in den linken Bereich der Kurve hineinzurechnen.¹⁹ Solche Korrekturverfahren steilen die Häufigkeitskurve im extremen Niedriggeschwindigkeitsbereich künstlich auf und reproduzieren damit eine Verteilungscharakteristik, die dem physikalischen Alltag auf den Straßen am nächsten kommt.

Synthese der Verteilungsmuster und Schlussbetrachtung

Zusammenfassend lässt sich aus der detaillierten Analyse der internationalen und nationalen

Unfalldatenbanken ein kohärentes, wenngleich in seinen Parametern hochkomplexes Bild der empirischen Häufigkeiten von Aufprallgeschwindigkeiten zeichnen. Die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion von Kollisionsgeschwindigkeiten (v_{koll}) sowie aufprallbedingten Geschwindigkeitsänderungen (Δv) folgt keiner Normalverteilung, sondern einer stark rechtsschiefen, logarithmisch oder exponentiell anmutenden Kurve. Das mit weitem Abstand größte Volumen aller auf bundesdeutschen wie auch internationalen Straßen verzeichneten Aufprallereignisse bündelt sich am extremen unteren Ende der Geschwindigkeitsskala. US-amerikanische Daten aus über zwei Jahrzehnten belegen, dass kumulativ zwischen 71 und 85 Prozent aller Frontal-, Heck- und Seitenkollisionen bei einem Δv von unter 24,1 km/h (15 mph) abgewickelt werden.¹¹ Entsprechende Daten für den bundesdeutschen Raum bestätigen dieses Bild vollumfänglich: Etwa zwei Drittel aller erfassten Insassen erleben ein Δv von unter 20 km/h, weitere knapp 30 Prozent ein Δv zwischen 20 und 39 km/h.¹²

Betrachtet man die isolierten Aufprallgeschwindigkeiten (v_{koll}) im asymmetrischen Kontakt mit ungeschützten Verkehrsteilnehmern, sinken die Mittelwerte noch weiter. Über 92 Prozent aller Fahrrad-Kollisionen ereignen sich unterhalb von 40 km/h, wobei die Durchschnittsgeschwindigkeiten je nach Sub-Szenario zwischen tiefen 14 km/h (Abbiegeunfälle) und 28 km/h (Geradeausfahrt) pendeln.¹⁴ Ausreißer nach oben finden sich fast ausschließlich bei hochspezifischen Szenarien, wie etwa Lkw-Auffahrunfällen, deren Mittelwert sich in Richtung 75 bis 90 km/h verschiebt¹⁸, oder bei Alleinunfällen gegen stationäre Hindernisse im ländlichen Raum, bei denen die Hälfte der Kollisionen Geschwindigkeiten von über 50 km/h aufweist.¹⁶

Die Analyse dokumentiert somit zweifelsfrei, dass Aufprallgeschwindigkeiten jenseits der 60 km/h-Marke rein quantitativ äußerst seltene Phänomene im statistischen Gesamttrauschen des globalen Verkehrsgeschehens darstellen. Die physikalische Realität der Fahrzeugkollision ist, gemessen an ihrer bloßen Häufigkeit, ein Niedriggeschwindigkeitsereignis.

Referenzen

1. Injury Severity for Hazard and Risk Analyses: Calculation of ... - ircobi, Zugriff am April 3, 2026, <https://www.ircobi.org/wordpress/downloads/irc25/pdf-files/2516.pdf>
2. Estimating Crash Severity: Can Event Data Recorders Replace Accident Reconstruction? - NHTSA, Zugriff am April 3, 2026, <https://www.nhtsa.gov/sites/nhtsa.gov/files/18esv-000490.pdf>
3. Abstract This paper describes the development of delta-V and pre-crash speeds by crash type and vehicle type for crashes on Indi - JPRI, Zugriff am April 3, 2026, <https://www.jpri.in/wp-content/uploads/pdf/JP%20Research%20India-IRCOBI2015.pdf>
4. GIDAS is the German In-Depth Accident Study. Compared to the national traffic accident statistics, GIDAS provides insights into traffic accidents in selected survey areas. While the national traffic accident statistics concisely summarize information on the basis of traffic accidents with personal injury documented by

the police, data of a much higher and interdisciplinary level of detail are necessary for modern, scientifically sound road safety work. This project was established to gain this in-depth knowledge of the course and severity of traffic accidents.,
Zugriff am April 3, 2026, <https://www.gidas.org/start-en.html>

5. Road Traffic Accident Research in Germany - GIDAS - GERMAN IN-DEPTH ACCIDENT STUDY - UNECE, Zugriff am April 3, 2026,
https://unece.org/sites/default/files/2024-11/241025_WHO_UNECE_Experiences%20in%20Multi-Disciplinary%20Collision%20Investigation_GIDAS_SHARE.pdf
6. Comparison of Real World Side Impact Collisions which Occurred in the United Kingdom and United States - PMC, Zugriff am April 3, 2026,
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3400231/>
7. Demographics, Velocity Distributions, and Impact Type as Predictors of AIS 4+ Head Injuries in Motor Vehicle Crashes - PMC, Zugriff am April 3, 2026,
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3256840/>
8. Accident Data: Side Impacts with Poles - UNECE, Zugriff am April 3, 2026,
<https://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2010/wp29grsp/PSI-01-11e.pdf>
9. Unfallforschung 2021 - ADAC Stiftung, Zugriff am April 3, 2026,
https://stiftung.adac.de/wp-content/uploads/2021/06/Tagungsband_UFO2021.pdf
10. Evaluation of Advanced Air Bag Deployment Algorithm Performance using Event Data Recorders - PMC, Zugriff am April 3, 2026,
<https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC3256779/>
11. Injury by Delta V in Front, Near-Side, Far-Side and ... - Regulations.gov, Zugriff am April 3, 2026,
https://downloads.regulations.gov/NHTSA-2024-0001-0010/attachment_7.pdf
12. Insassen- merkmale und Verletzungs- schwere - UDV, Zugriff am April 3, 2026,
<https://www.udv.de/resource/blob/194824/4d789bee049f40cb28a4559e8437aad/102-insassenmerkmale-d-data.pdf>
13. FIA Region I policy study Vision Zero, the ageing population, and the ..., Zugriff am April 3, 2026,
<https://www.fiaregion1.com/wp-content/uploads/2024/06/FIA-Expert-Study-Vision-Zero-ageing-population-and-impact-of-rapidly-evolving-infrastructure-and-digital-transformation.pdf>
14. Einfluss neuartiger Mobilitätskonzepte mit vulnerablen Verkehrsteilnehmern auf die Fahrzeugsicherheit - OPUS, Zugriff am April 3, 2026,
<https://opus4.kobv.de/opus4-haw/files/2200/1001004890Abschlussarbeit.pdf>
15. Analyse der Radfahrer-Pkw-Kollision - UDV, Zugriff am April 3, 2026,
<https://www.udv.de/resource/blob/78614/351a0c8370a5d31e086d1411df74fbeat/36-analyse-der-radfahrer-pkw-kollision-data.pdf>
16. 22Baumunfälle - Deutscher Verkehrssicherheitsrat, Zugriff am April 3, 2026,
<https://www.dvr.de/fileadmin/downloads/Schriftenreihe/Schriftenreihe-Verkehrssicherheit-22.pdf>
17. CLIENT PROJECT REPORT CPR1825 Pedestrian legform test area assessment Final report JA Carroll, A Barrow, BJ Hardy, B Robinson - UNECE Wiki, Zugriff am April 3, 2026,
<https://wiki.unece.org/download/attachments/23101696/TF-BTA-6-09e.pdf>

18. die verkehrssicherheit leichter nutzfahrzeuge, Zugriff am April 3, 2026,
[https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2009/419118/IPOL-TRAN_ET\(2009\)419118_DE.pdf](https://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/STUD/2009/419118/IPOL-TRAN_ET(2009)419118_DE.pdf)
19. Injury risk curves to guide safe speed limits on Swedish roads using ..., Zugriff am April 3, 2026,
https://research.chalmers.se/publication/540990/file/540990_Fulltext.pdf