

### 5.2 Biomechanik des Fußgängerunfalls

Nach Angaben des Statistischen Bundesamts Deutschland werden jährlich über 2,3 Millionen Verkehrsunfälle polizeilich erfasst. 16% davon (das sind ca. 380.000) sind mit Personenschaden (einer oder mehrerer Personen) verbunden. Etwa zwei Drittel der Unfälle mit Personenschaden (das sind ca. 240.000) ereignen sich innerörtlich, also in dem Bereich, in dem der Fußgänger als Verkehrsteilnehmer dominiert.

Von den insgesamt ca. 500.000 verletzten Verkehrsteilnehmern sind nur ca. 7,5% (das sind ca. 38.000) Fußgänger. Ihr relativer Anteil an den Getöteten ist nahezu doppelt so hoch (ca. 13%; das sind 900 ... 1.000) [S1], Tab. 5.2.1.

Dieses Verhältnis drückt die höhere Gefährdung des Fußgängers aus, der «völlig ungeschützt von Maschinen angefahren (wird), die ... ein Mehrfaches seines Eigengewichts haben.» [G1]

ROPOHL [R1] fand im Freiburger Untersuchungsgut, dass mehr als die Hälfte der getöteten Fußgänger älter als 60 Jahre war. Laut Statistischem Jahrbuch machen die über 60-Jährigen weniger als 25% der deutschen Bevölkerung aus: «Der Fußgängerunfall ist der Unfall des älteren Menschen.»

Unter 5.000 durch Straßenfahrzeuge verletzten Fußgängern in Kalifornien lag die Mortalität bei den über 65-jährigen Patienten bei 27,8%, bei den bis 14-Jährigen lediglich bei 3,1% [P4].

#### 5.2.1 Kollisionsarten und Fragestellungen an den Gutachter

Als Kollisionspartner des Fußgängers dominieren Pkw, bei tödlichen Unfällen in 75 ... 90% [R1]. Am häufigsten wird der Fußgänger von der Pkw-Front erfasst (Vollstoß). Bei ASHTON u. MACKAY [A2] war die Fahrzeugfront in 84% der Unfälle die primäre Kontaktstelle. Teilstöße, bei denen nicht alle Körperteile von frontalen Fahrzeugteilen erfasst werden (z.B. nur ein Bein von einem Kotflügel), und Streifstöße sind seltener, Abb. 5.2.1.

Der medizinische Gutachter wird bei diesen Unfällen nach der Anfahrtrichtung und der Anfahrteschwindigkeit gefragt. Bei Beteiligung mehrerer Pkw ist die Frage, welche Kollision für einzelne (schwere oder tödliche) Verletzungen verantwortlich war, manchmal nicht sicher zu beantworten. Liegt Fahrerflucht vor, werden auch vom medizinischen Sachverständigen ggf. Hinweise auf das verursachende Fahrzeug erwartet.

Eine Sonderform des Fußgängerunfalls ist die Überrollung. Zu beantworten sind dann die Fragen, ob der Ver-

	2002	2003	2004
Anzahl peU	2.289.474	2.259.567	2.261.689
davon mit Personenschaden:	362.054	354.534	339.310
davon innerorts	233.865	230.521	223.314
Anzahl Verletzte	476.413	462.170	440.126
davon Fußgänger	36.343	35.015	34.077
Anzahl Getötete	6.842	6.613	5.842
davon Fußgänger	873	812	838

Tab. 5.2.1: Polizeilich erfasste Unfälle (peU), Verletzte und Getötete (mit Anteil der Fußgänger) – Statistisches Bundesamt Deutschland

letzte / Getötete primär (d.h. ohne vorausgegangene Kollision) auf der Fahrbahn gelegen hat, ob der Tod ggf. schon vor der Überrollung eingetreten ist und / oder ob sich (bei Fahrerflucht) Hinweise auf das verursachende Fahrzeug ergeben.

#### 5.2.2 Verletzungshäufigkeiten

Verletzungen des Fußgängers entstehen

- beim Primärstoß (siehe Abschnitt 5.2.4), d.h. beim primären Anprall an die Fahrzeugfront (Beine, Hüfte, Becken) und beim Aufschöpfungsvorgang (Schulter, Schädel, HWS, BWS, Thorax), sowie
- beim Sekundärstoß, d.h. beim Aufprall auf die Straße.

Überwiegend wird die Meinung vertreten, dass die Verletzungen durch den Sekundärstoß deutlich leichter sind als die beim Primärstoß erlittenen [A2, R6]. Bei 171 Pkw-Fußgänger-Unfällen von ASHTON [A3] hatten 65% der Kopfkontakte mit der Straße lediglich zu leichten Verletzungen geführt, nur 11% zu kritischen oder tödlichen. Die entspre-

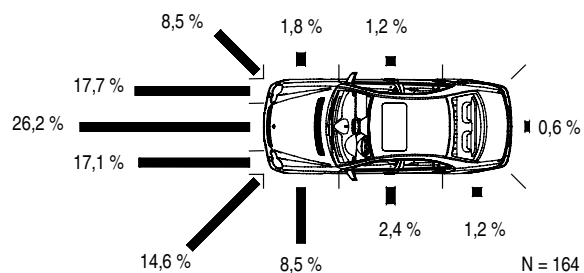


Abb. 5.2.1: Lage des Erstkontaktes von Fußgängern am Fahrzeug [A2]. Die Fußgänger-kollisionen mit der linken Fahrzeugseite sind in Großbritannien – vermutlich infolge des Linksverkehrs – deutlich häufiger als die mit der rechten.

Schweregrad	Beispiele für Verletzungen
AIS 0	unverletzt
AIS 1	leicht verletzt (oberflächliche Wunden, Prellungen)
AIS 2	mittelschwer (tiefe Wunden, Gehirnerschütterung mit Bewusstlosigkeit bis zu 15 Minuten, unkomplizierte Röhrenknochenbrüche, einzelne Rippenbrüche)
AIS 3	schwer, aber – bei Behandlung – nicht lebensgefährlich (dislozierte Schädelbrüche ohne Hirnverletzung, Wirbelsäulenluxationen ohne Verletzung des Rückenmarks, multiple Rippenbrüche ohne Brustkorbinstabilität)
AIS 4	ernst, möglicherweise lebensgefährlich, meist überlebt (Gehirnerschütterung mit oder ohne Schädelbruch mit Bewusstlosigkeit bis 24 Stunden, Brustkorbinstabilität, Blasen-, Leber-, Milz-, Darmzerreißung, Wirbelsegmentaufklappung)
AIS 5	kritisch, fragliche Überlebenschance, ohne ärztliche Hilfe nicht überlebbar (Herz- und Darmzerreißungen, Bewusstlosigkeit > 24 Stunden)
AIS 6	tödlich (HWS-Verletzungen oberhalb des dritten HWK mit Rückenmarksverletzung, schwere offene Verletzungen in zwei Körperhöhlen)

**Tab. 5.2.2:** Beispiele für Verletzungen bei verschiedenen AIS-Schweregraden in verschiedenen Körperregionen

chenden Prozentsätze bei den Kopfanstößen an das Fahrzeug lagen bei 38 bzw. 22%.

APPEL et al. weisen allerdings darauf hin, dass in Verbindung mit einem ungünstigen Aufprallmuster (Aufkommen mit Kopf oder Becken, auch «tertiärer» Anprall gegen ein Hindernis) durchaus schwere Verletzungen entstehen können [A1].

Bei mittleren und hohen Anfahrsgeschwindigkeiten werden oft mehrere Körperregionen des Fußgängers verletzt (Polytrauma). FISHER und HALL [F2] fanden nach Kollisionen bis 16 km/h im Mittel 1,6, bei Kollisionen mit > 82 km/h 2,4 Verletzungen pro Fußgänger. Bei tödlichen Fußgängerunfällen ist das Polytrauma die Regel [R1]. Werden Unfälle aller Schweregrade erfasst, so liegt die Häufigkeit des Polytraumas bei 25 ... 40% [R1, G1].

Die Angaben zur Verteilung der Verletzungen auf die verschiedenen Körperregionen unterscheiden sich je nach Untersuchung. Die Verteilung wird entscheidend davon beeinflusst, ab welchem Schweregrad man von einer Verletzung spricht. Wenn auch leichte Verletzungen miterfasst werden, stellen die Beine die am häufigsten verletzte Region dar (70 ... 90%). Die Kopfverletzungen rücken an die Spitze, wenn nur schwere Verletzungen berücksichtigt werden (57 ... 62%) [A2]. Wie zu erwarten, ist der Kopf auch bei Betrachtung tödlicher Verkehrsunfälle die am häufigsten

verletzte Körperregion (64%) [F1]. Bei ROPOHL [R1] waren Kopfverletzungen am häufigsten primär todesursächlich (42%), gefolgt von Brustkorbverletzungen (35%).

### 5.2.3 Verletzungsschwere, Belastungsgrenzwerte

Die Biomechanik beschäftigt sich unter anderem damit, welche Belastungen der menschliche Körper unverletzt ertragen kann, bzw. welche mechanische Belastung welche Verletzungsschwere bewirkt. Dies ermöglicht bspw. die gezielte Auslegung passiver Sicherheitseinrichtungen. Während die Belastung mit bewährten physikalischen Einheiten stets recht gut zu erfassen war, musste anfangs für die Beurteilung der Verletzungsschwere erst eine verbindliche Skala erarbeitet werden. Nur unter Rückgriff auf eine solche Skala kann man dann einen engen funktionalen Zusammenhang zwischen Belastung und Verletzungsschwere erarbeiten bzw. die Ergebnisse verschiedener Studien untereinander vergleichen. Durchgesetzt hat sich international am ehesten die AIS (*Abbreviated Injury Scale*) [S2]: Einzelverletzungen in sieben Körperregionen (Kopf, Hals, Brustkorb, Bauch und Beckeninhalte, Wirbelsäule, Extremitäten und knöchernes Becken, Körperoberfläche) werden jeweils in sieben Verletzungsschweregrade eingeordnet, die im Wesentlichen die Lebensbedrohlichkeit widerspiegeln, Tab. 5.2.2.

Die praktisch wichtigsten Einzelverletzungen werden im AIS-Manual bezüglich ihrer Verletzungsschwere bewertet.

Als Gesamtverletzungsschwere eines Polytraumatisierten wird mitunter die MAIS (*Maximal-AIS*), der AIS-Grad der schwersten Einzelverletzung, bezeichnet [A1], mitunter die OAIS (*Overall-AIS*), ein Wert, der auf der Grundlage einer

Region	Verletzung	AIS	(AIS <sub>1,2,3</sub> ) <sup>2</sup> *
Kopf /Hals	Hirnkontusion	3	9
Gesicht	Keine Verletzung	0	
Thorax	Brustkorbinstabilität	4	16
Abdomen	Geringe Leberprellung	2	
	Massive Milzruptur	5	25
Extremitäten	Oberschenkelfraktur	3	
Oberfläche	Keine Verletzung	0	
ISS			50

\* Bei der Ermittlung des ISS werden die Quadrate der drei höchsten AIS-Werte addiert. Liegt ein AIS-Wert 6 vor (nicht überlebar), gilt der maximale ISS-Wert (=75)

**Tab. 5.2.3:** Beispiel für die Ermittlung des Injury Severity Score (ISS) nach [B2] aus den AIS-Werten (Abbreviated Injury Scale)

klinisch-prognostischen Einschätzung aller Einzelverletzungen das Ausmaß der Polytraumatisierung ausdrücken soll [R1].

Für Polytraumatisierte wurde auf der Grundlage der AIS der *Injury Severity Score* (ISS) entwickelt [B2]: Die Quadrate der AIS-Werte 1 ... 5 in den drei am schwersten verletzten Körperregionen werden addiert. Es ergeben sich Werte zwischen 0 und 75. Liegt ein AIS-Wert bei 6 («nicht überlebar»), so ergibt sich daraus der maximale ISS von 75, Tab. 5.2.3.

Besser als der ISS soll der ebenfalls auf der AIS beruhende «*Probability of Death Score*» (PODS) mit der tatsächlichen Mortalität korrelieren [S3]:

$$PODS = (2,2 \times \text{höchster AIS-Wert}) + (0,9 \times \text{zweithöchster AIS-Wert}) - 11,3$$

PODSa bezieht das Alter ein:

$$PODSa = (2,7 \times \text{höchster AIS-Wert}) + \text{zweithöchster AIS-Wert} + (0,6 \times \text{Alter}) - 15,4$$

Für den Kopf wurde im FMVSS 208 (*Federal Motor Vehicle Safety Standard*) der USA das *Head Injury Criterion* (HIC) definiert, das die Belastbarkeit des Kopfs durch Beschleunigungen in Abhängigkeit von der Einwirkungszeit erfasst:

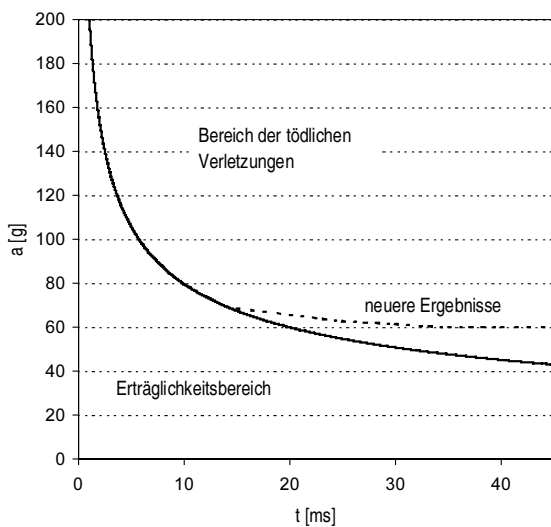


Abb. 5.2.2: Die Erträglichkeitsgrenze des Schädel – Hirnbereichs in Abhängigkeit von der Dauer einwirkender Beschleunigungen ([A1], nach Patrick)

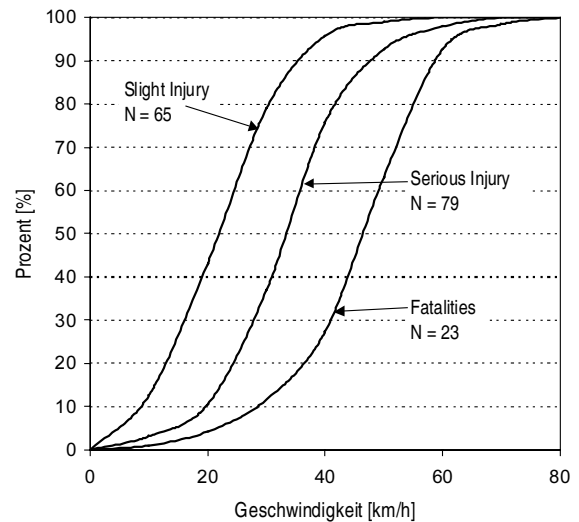


Abb. 5.2.3: Verletzungsschwere bei Pkw – Fußgängerunfällen (leicht, schwer, tödlich) in Abhängigkeit von der Kollisionsgeschwindigkeit [A2]

$$HIC = \left[ \left( \frac{1}{t_2 - t_1} \cdot \int_{t_1}^{t_2} a_{res} dt \right)^{2,5} \cdot (t_2 - t_1) \right]_{max} \quad (5.2.1)$$

mit  $a_{res}$  als Resultierender der Kopfverzögerung in den drei Achsen; die Zeitpunkte  $t_1$  und  $t_2$  sind innerhalb des gesamten Beschleunigungsverlaufs so zu wählen, dass sich der maximale HIC-Wert errechnet.

Als Schutzkriterium für den Kopf gilt ein HIC-Wert von 1.000. Nach APPEL et al. [A1] entspricht AIS 3 für den Kopf einem HIC-Wert von 930, AIS 6 (nicht überlebar) für den Kopf einem HIC-Wert von 1.635.

Die Abhängigkeit der Toleranzgrenze der Schädel-Hirn-Region von der Dauer einwirkender Beschleunigungen wird in der Patrickkurve anschaulich dargestellt, Abb. 5.2.2.

Zur groben Orientierung geeignet ist die Darstellung des Zusammenhangs zwischen Verletzungsgrad (leicht, schwer, tödlich) und Kollisionsgeschwindigkeit von [A2], Abb. 5.2.3. Es kommt hier auch zum Ausdruck, dass in Ausnahmefällen leichte Verletzungen bei relativ hohen Kollisionsgeschwindigkeiten und umgekehrt tödliche Ausgänge bei geringen Geschwindigkeiten eintreten können.

Mit einer festen Korrelation zwischen der nach AIS eingeschätzten Lebensgefährdung und der mechanischen Einwirkung ist nur mit Einschränkung zu rechnen, weil die Ver-