

Manfred Becke*, William Castro**,
Achim van Aswegen***, Stefan Meyer****

Zur Belastung von Fahrzeuginsassen bei leichten Seitenkollisionen

Zusammenfassung

Im Rahmen von 10 Pkw-Crashversuchen und 22 Versuchen mit Probanden auf einem speziellen Beschleunigungsschlitten wurde der Bewegungsablauf von Fahrzeuginsassen bei seitlichen Kollisionen untersucht. Mit dem seitlich offenen Beschleunigungsschlitten ließen sich ohne Verletzungsrisiko Belastungen simulieren, die im geschlossenen Fahrzeug zu Kopf- und Schulterkontakt des Insassen mit Fahrzeugteilen geführt hätten. Die Bewegungsanalyse der Testpersonen im Schlittentest zeigt, daß für stoßzugewandt sitzende Fahrzeuginsassen ein Schulteranstoß an der Türverkleidung und ein leichter Kontakt des Kopfes an der Seitenscheibe oder der B-Säule schon quer zur Fahrzeuglängsachse von 5 km/h erfolgen kann. Im Rahmen der forensischen Begutachtung sind neben den technischen Kollisionsparametern auch die seitlichen Raumverhältnisse im Kopf- und Schulterraum des Fahrzeugs zu ermitteln. Dabei hat die Größe des Insassen erheblichen Einfluß und ihre Berücksichtigung ist somit unerlässlich.

Summary

Within the framework of 10 automobile crash tests and 22 experiments with test persons on a special sled, the motion of vehicle occupants during side collisions was analysed. Using the acceleration sled which is open at the sides, it was possible – without risk of injury – to simulate stresses which in a closed vehicle would have led to the occupant's head and shoulder coming into contact with parts of the vehicle. The motion analysis of the test persons in the sled experiment shows, that for occupants facing the impact, a shoulder impact on the door trim and a light contact of the head on the side window or the B-pillar can occur at a collision-caused change in velocity above 5 km/h. Within the framework of the forensic assessment not only the technical collision parameters, but also spatial relationships in the head and shoulder area of the vehicle must be determined. In this connection the size of the occupant is of great importance and must therefore be taken into account.

1 Einführung

In der täglichen Praxis der forensisch tätigen Unfallsachverständigen steigt die Anzahl der Gutachten zur Frage der Verletzungskausalität leichter Fahrzeugkollisionen seit Jahren stetig an. Zur Beurteilung der Belastung beim Heckaufprall steht mittlerweile eine stattliche Anzahl von Belastungsversuchen mit Testpersonen zur Verfügung. Ein aktueller Überblick und eine Zusammenfassung der wichtigsten Probandenversuche zum Thema Heckaufprall [4, 6, 8, 9, 10, 12 - 18] findet sich in [11]. Danach können bislang insgesamt etwa 500 Belastungstests mit Freiwilligen zur Festlegung eines »Harmlosigkeitsbereiches« herangezogen werden. Der Harmlosigkeitsbereich trägt pauschal dem Umstand der individuell differierenden Belastbarkeit verschiedener Personen Rechnung. Er ist bewußt niedrig angesetzt, um die Beurteilung besonders geringer Belastungen zu vereinfachen, ohne Kompromisse bei der Aussagesicherheit einzugehen. Belastungen im Harmlosigkeitsbereich werden von allen Personen, also auch von Personen mit Vorschäden, ohne Verletzungen toleriert.

Auf dem Gelände des Ingenieurbüros Schimmelpfennig + Becke wurde in den Jahren 1996 und 1997 in Zusammenarbeit mit der Akademie für Manuelle Medizin an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster eine umfangreiche Untersuchung zur Belastbarkeit der Halswirbelsäule mit Pkw- und Autoskooter-Insassen durchgeführt [2, 3, 7, 11]. Bei dieser Untersuchung hat sich gezeigt, daß vor allem die Geschwindigkeitsän-

derung im gestoßenen Fahrzeug als Kenngröße für das Verletzungsrisiko herangezogen werden kann. Kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderungen von bis zu 11 km/h bzw. mittlere Fahrgastzellenbeschleunigungen von 3 g in den heckseitig angestoßenen Fahrzeugen können in der Regel als harmlos für die HWS bezeichnet werden.

Die Fachliteratur zu seitlichen Fahrzeugkollisionen betrifft im wesentlichen Versuche mit höheren Kollisionsgeschwindigkeiten, die weit oberhalb des Harmlosigkeitsbereiches mit oder ohne Testpuppen durchgeführt werden und kaum Rückschlüsse auf die Verhältnisse bei geringen Belastungen zulassen. Hier sind insbesondere die gesetzlich vorgeschriebenen Normtests zu nennen.

Eine Versuchsreihe von 10 leichten Pkw-Pkw-Seitenkollisionen unter Beteiligung von Probanden führte der Europäische Wissenschaftliche Arbeitskreis 1997 durch [5]. Dabei wurde jeweils ein stehender, mit zwei Personen besetzter Pkw von einem zweiten Pkw seitlich angefahren. Die Messung der Fahrzeugbeschleunigungen erfolgte mit Unfalldatenspeichern. Bei Kollisionsdauern zwischen 0,05 und 0,15 s (je nach Anstoßwinkel z.T. auch länger) und maximalen Fahrzeugbeschleunigungen von 15 bis 40 m/s² ergaben sich Geschwindigkeitsänderungen des gestoßenen Fahrzeugs von 2 bis 8 km/h. Ein Kopfanstoß der stoßzugewandt sitzenden Insassen wird in dem Bericht nicht erwähnt. Es blieben alle Testpersonen unverletzt. Mindestens zwei der Probanden verspürten aber unmittelbar nach dem Stoß ein »leichtes Ziehen am Hals«, das nach wenigen Stunden wieder verschwand.

Das Ziel der vorliegenden experimentellen Studie war es nunmehr, weitere Anhaltspunkte zur Beurteilung der Belastung von Fahrzeuginsassen bei leichten seitlichen Pkw-Kollisionen zu erhalten.

2 Untersuchungsansatz

Im Rahmen dieser Studie wurden vom Ing.-Büro Schimmelpfennig + Becke Fahrzeug- und Schlittenkollisionen unter Beteiligung von Testpersonen durchgeführt. Das Interesse galt dem Bewegungsablauf der Probanden und der Frage nach der Querbeltung des Fahrzeugs, ab der die Möglichkeit eines seitlichen Anstoßes des Fahrzeuginsassen im Fahrgastraum nicht mehr auszuschließen ist. Zu diesem Zweck wurden insgesamt

- zehn verschiedene Pkw mit drei unterschiedlich großen Insassen besetzt und im seitlichen Kopf- und Schulterraum vermessen.
- Zehn Pkw-Pkw-Kollisionen (davon fünf mit Dummy- und zwei mit Freiwilligenbeteiligung) und
- 31 Schlittenkollisionen auf einem seitlich offenen Versuchsschlitten (davon 22 mit Testpersonen und neun mit Dummys) im Rahmen einer Diplomarbeit [1] durchgeführt und ausgewertet.

Die Messung der Fahrgastzellenbeschleunigung erfolgte durch Unfalldatenspeicher (UDS). Um den typischen Ablauf realer Kreuzungsunfälle nachzustellen, befanden sich bei den Pkw-Pkw-Kollisionen beide Fahrzeuge in Bewegung. In Analogie zu früheren Untersuchungen beim Heckaufprall wurde die Geschwindigkeitsänderung in der Belastungsrichtung des Fahrzeugs als Parameter für die Insassenbelastung herangezogen.

3 Beschleunigungseinwirkung bei Fahrzeugkollisionen

An der folgenden Fahrzeugkollision zwischen einem Ford Sierra und einem Opel Rekord werden die Besonderheiten einer seitlichen Kollision mit zwei bewegten Fahrzeugen deutlich.

Beide Fahrzeuge bewegen sich vorwärts, frei rollend mit einer Geschwindigkeit von 11 km/h in die Kollision. Der Ford trifft den Opel unter einem Winkel von 135° schräg von vorn an der Beifahrertür. An den Fahrzeugen entstehen mäßige Schäden, wie die in **Bild 2** erkennbare ca. 10 cm tief eingedrückte Tür des Opel Rekord und die in **Bild 3** erkennbare Stauchung am vorderen rechten Kotflügel des Ford. Die gefahrenen Kollisionsgeschwindigkeiten führen nicht zur Intrusion von Fahrzeugbauteilen in die Fahrgastzelle.

*Dipl.-Ing. Manfred Becke, Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Straßenverkehrsunfälle, IHK Münster, c/o Ing.-Büro Schimmelpfennig + Becke, Münsterstraße 101, 48155 Münster-Wolbeck

**Akademie für Manuelle Medizin an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, Leitende Ärzte: Dr. med. Markus Schilgen, Prof. Dr. med. William Castro, Von-Esmarch-Straße 56, 48149 Münster

***Dipl.-Ing. Achim van Aswegen, Schutzsysteme Seitenaufprall, c/o ACTS GmbH & Co. KG, Kurfürst-Eppstein-Ring, 63877 Sailauf

****Dipl.-Ing. Stefan Meyer, c/o Ing.-Büro Schimmelpfennig + Becke, Münsterstraße 101, 48155 Münster-Wolbeck

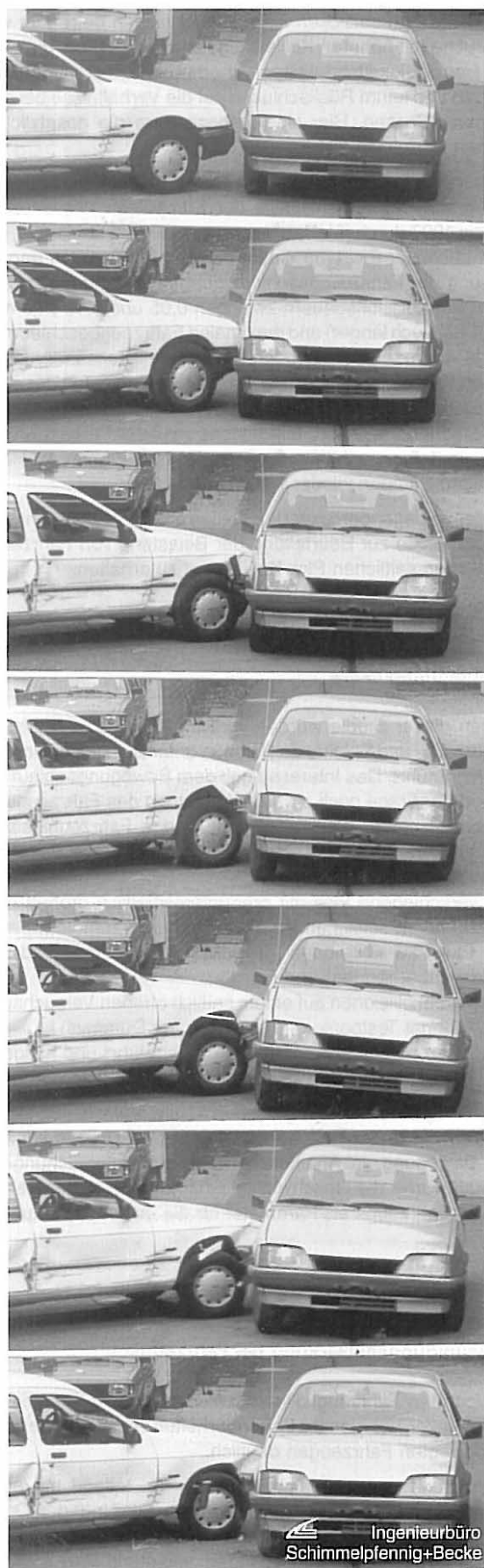


Bild 1 Seitenkollision, Bildabstand: 0,08 s
Fig. 1 Side Impact, time between frames: 0,08 s



Bild 2 Deformation Opel Rekord, Hauptbelastungsdauer: 0,07 s, mittlere Beschleunigung während der Hauptbelastungsdauer: 9 m/s^2 , kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung quer zur Fahrtrichtung: 2,3 km/h

Fig. 2 Deformation Opel Rekord, Main stress duration: 0,07 s, mean acceleration during main stress duration: 9 m/s^2 , change in velocity during impact: 2,3 km/h



Bild 3 Deformation Ford Sierra
Fig. 3 Deformation Ford Sierra

4 Die Hauptbelastungsdauer

In der Praxis der Unfallrekonstruktion wird zur Beurteilung der biomechanischen Insassenbelastung die mittlere Fahrzeugbeschleunigung und die Geschwindigkeitsänderung während der gesamten Kollisionsdauer herangezogen. Für einfache Kollisionen (z.B. Heckaufprall oder Seitenaufprall im stumpfen Winkel auf ein stehendes Fahrzeug) ist dieses Verfahren geeignet. Zur Beurteilung der Belastung in einem fahrenden, seitlich angestoßenen Pkw kann jedoch eine genauere Betrachtung erforderlich sein.

Die seitliche Kollision zweier bewegter Fahrzeuge führt nach dem ersten Anstoß unter Umständen zu einer Verhakung der Fahrzeuge. Der Grund dafür liegt in der Beschaffenheit der Fahrzeugseite. Die Flanke des Pkw weist abwechselnd Bereiche sehr hoher und sehr niedriger Struktursteifigkeit auf. Zwischen den strukturstreifen Bereichen der Räder und der A-, B- und C-Säulen befinden sich jeweils die nachgiebigen Zonen der Kotflügel und Türblätter. Insbesondere bei Kollisionswinkeln im Bereich von 45° oder 135° kommt es zur Intrusion einer Frontecke des stoßenden Fahrzeugs in einen strukturweichen Bereich des gestoßenen Fahrzeugs. Durch die weitere Fahrbewegung entsteht eine Verhakung am nächsten strukturstreifen Bauteil. Das mit der Front verhakete stoßende

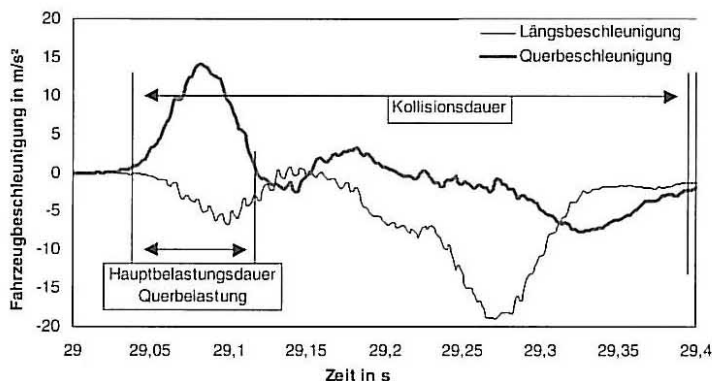


Bild 4 Beschleunigungsverlauf Opel Rekord
Fig. 4 Acceleration signals Opel Rekord

Fahrzeug wird von dem seitlich getroffenen mitgerissen. Die Verzögerung des getroffenen Fahrzeugs erfolgt dann ohne nennenswerte Querbewegung. Das aufgezeichnete Beschleunigungssignal weist zeitlich zueinander versetzte Längs- und Querbewegungen auf. In solchen Fällen ist es zur Ermittlung der biomechanischen Insassenbelastung notwendig, die »Eindringungsphase« von der »Verhakungsphase« getrennt zu betrachten. Die Aufzeichnung der Längs- und Querbewegung des Opel Rekord in Bild 4 soll dies verdeutlichen:

Das Diagramm zeigt einen für das seitlich gestoßene Fahrzeug bei verhaktem Stoß charakteristischen Beschleunigungsverlauf. Der erste Teil der Kollision stellt das Eindringen der Beifahrertür des Opel Rekord dar. Dabei kommt es zu einer Querbewegung des Opel. Im Verlauf der Kollision verhakt sich der Ford an der B-Säule des Opel. Der Kraftaustausch zwischen den Fahrzeugen erfolgt jetzt in Fahrzeuginnenrichtung und verzögert den Opel. Die Hauptanteile der Quer- und Längsbewegung sind zeitlich zueinander versetzt. Die Querbewegung setzt früher ein und endet auch früher als die Verzögerung des Fahrzeugs in Längsrichtung. Die gesamte Kollisionsdauer beträgt ca. 0,36 s. Die Zeit, in der die Querbewegung wirkt, beschränkt sich jedoch auf ca. 0,07 s. Für die seitliche Belastung des Insassen und die Frage, ob er an Tür oder Seitenscheibe anstößt, ist nur diese Phase der Kollision entscheidend. Würde man die mittlere Querbewegung über die gesamte Kollisionsdauer berechnen, so ergäbe sich ein viel zu geringer Wert, in diesem Beispiel zufällig 0 m/s². Diese rechnerisch richtige Angabe ist in der Praxis wertlos. Die entscheidende Belastung zu Beginn der Kollision hebt sich mit dem Zurückwanken des Fahrzeugs nach dem ersten Kontakt auf. Um eine sinnvolle Angabe zur seitlichen Belastung zu erhalten, ist es zweckmäßig, nur den Teil der Kollision zu betrachten, der die Dauer der relevanten Belastung enthält. Dieser Zeitraum soll als Hauptbelastungsdauer bezeichnet werden. Die Hauptbelastungsdauer in Querrichtung (»Hauptquerbelastungsdauer«) beträgt in diesem Beispiel 0,07 s. Die mittlere Querbewegung während der Hauptquerbelastungsdauer ergibt sich zu 9 m/s². Ebenso läßt sich eine Hauptbelastungsdauer für die Längsrichtung festlegen. Da die Längsbewegungen der im Rahmen dieser Arbeit gefahrenen Versuche für die Fahrzeuginsassen harmlos sind und auch nicht zu einem Kontakt mit Fahrzeugteilen führen, wird die Hauptbelastungsdauer in Fahrzeuginnenrichtung nicht näher betrachtet. Die mittlere Längsbewegung während der Hauptquerbelastungsdauer wird jedoch zur Feststellung der resultierenden Bewegungsrichtung des Insassen verwendet.

Die Fahrgeschwindigkeit des an der Seite getroffenen Fahrzeugs hat keinen wesentlichen Einfluß auf die Querbewegung seiner Insassen. Für die Querbewegung der Insassen sind neben der Masse des eigenen Fahrzeugs die Masse und die Geschwindigkeit des Unfallgegners sowie die Anstoßstelle und der Kollisionswinkel bestimmend. Die Struktursteifigkeit und Elastizitäten normaler Pkw bedingen, daß der wesentliche Querkraftaustausch zwischen zwei Fahrzeugen im Zeitrahmen einer »normalen« Kollision¹ abläuft. Kollisionsdauern von mehr als 0,2 s ergeben sich nur aus einem Belastungswechsel durch verhakte Kollisionen, einen Sekundärstoß oder eine Streifkollision mit sehr geringer Querkomponente. Eine überlange Kollisionsdauer bei gleichbleibend hoher Querbewegung wird durch die elastischen Eigenschaften der Fahrzeugstruktur verhindert.



Bild 5 Versuchsschlitten
Fig. 5 Sled test



Bild 6 Anstoß durch Auto-Skooter
Fig. 6 Impact with bumper car

5 Beschleunigungsbewertung und Bewegungsablauf im Schlittenversuch

Um Erkenntnisse zur Bewegung von Fahrzeuginsassen bei leichten Seitenkollisionen zu gewinnen, ohne die Sicherheit der Probanden zu gefährden, wurde ein spezieller Beschleunigungsschlitten angefertigt. Der Schlitten besteht im wesentlichen aus dem Mittelteil der Fahrgastzelle eines Opel Kadett D. Die freigeschnittene Bodengruppe mit Fahrersitz und B-Säulen ist auf ein Fahrgestell mit Lenkrollen montiert und mit einem Unfalldatenspeicher (UDS der Fa. VDO-Kienzle) ausgerüstet. Der stehende Versuchsschlitten wird durch einen elektrisch betriebenen Autoskooter angestoßen. Die Geschwindigkeitsänderung des Schlittens wird aus den Aufzeichnungen des UDS ermittelt. Eine ortsfeste Videokamera zeichnet die Bewegung des Probanden auf.

6 Insassenbewegung

Die Krafteinwirkungen einer Kollision lassen sich durch Stoßimpulse beschreiben. Die Stoßimpulse zweier kollidierender Fahrzeuge sind vom Betrag her gleich groß, sie wirken aber in entgegengesetzter Richtung. Der Stoßimpuls ändert die Geschwindigkeit des Fahrzeugs. Die Insas-

sen bewegen sich relativ zum Fahrzeug entgegen der Impulsrichtung, bis sie an Fahrzeugteile anstoßen oder vom Rückhaltesystem aufgefangen werden. Aus der Sicht einer am Fahrzeug fest montierten Kamera bewegen sich die Fahrzeuginsassen während der Kollision durch den Fahrgastraum. Dem außenstehenden Betrachter stellt sich derselbe Vorgang als Bewegungsänderung des Fahrzeugs dar, bei dem die Insassen ihre Bewegung zunächst nach Richtung und Geschwindigkeit unverändert beibehalten. Die Relativbewegung zwischen Fahrzeug und Insassen beruht auf einem zeitlichen Versatz zwischen der kollisionsbedingten Kraftwirkung auf das Fahrzeug und der Kraftübertragung auf die Insassen.

Für die Bewegung des Probanden ist bei den hier untersuchten niedrigen Kollisionsgeschwindigkeiten die Gestaltung des Sitzes von entscheidender Bedeutung. Die Sitzfläche bildet mit ihren erhöhten Seitenteilen eine Mulde, deren Ausprägung durch das Körpergewicht des Probanden verstärkt wird. Die Lehne verfügt ebenfalls über eine seitlich erhöhte Polsterung. Die Lehnenpolsterung ist insgesamt weicher als die der Sitzfläche. Durch das Anlehnen entsteht ein verhältnismäßig geringer Anpreßdruck zwischen Lehne und Rücken des Probanden, der die Muldenform der Lehne ebenfalls (aber nicht in dem Maße, wie bei der Sitzfläche) verstärkt.

Die Querkraften werden teilweise durch Reibung und teilweise durch formschlüssige Verbindung übertragen. Von der Lehne kann, bedingt durch die weichere Polsterung und den geringeren Anpreßdruck, vergleichsweise wenig Kraft auf den Fahrer übertragen werden. Die Querbewegung des Fahrzeugs teilt sich dem Insassen im wesentlichen über die Sitzfläche mit. Der relativ schwere Oberkörper, Hals, Kopf und obere Extremitäten nehmen durch den geringen Kraftschluß mit der Sitzlehne zunächst nicht an der seitlichen Fahrzeugverlagerung teil. Der hohe Kraftschluß zwischen Sitzfläche und Becken des Insassen reicht hingegen aus, um Oberschenkel und Becken mit dem Fahrzeug seitlich zu versetzen. Die Fahrzeugbewegung überträgt sich also zuerst auf Gesäß und Oberschenkel des Insassen. Dadurch kommt es zur Kippbewegung des Insassen.

Die bei leichten Kollisionen zu Beginn der Bewegung beobachtete Kippbewegung und Rotation des Insassen um den Beckenbereich verursacht nur eine geringe Relativbewegung zwischen Kopf und Rumpf. Eine deutliche Seitneigung der Halswirbelsäule zeigt sich bei den Schlittenversuchen gar nicht oder erst, nachdem sich der Insasse aus der Fahrzeugkontur herausbewegt hat. Der Insasse in **Bild 6** erfährt eine Geschwindigkeitsänderung von 7,5 km/h bei einer mittleren Beschleunigung von 25 m/s^2 . Das Bild zeigt die maximale Auslenkung des Insassen 0,2 s nach Kollisionsbeginn. Eine deutliche Seitneigung der Halswirbelsäule ist nicht zu erkennen. In einem geschlossenen Pkw wäre es zu einem Kopf- und Schulteranstoß gekommen. Bei der Übertragung der Bewegungssequenzen aus den Schlittenversuchen auf reale Kollisionen mit geschlossenen Fahrzeugen ist dies zu bedenken. Die weitere Bewegung auf dem Schlitten ist für den Vergleich mit einer Fahrzeugkollision nur bei entsprechend größerer seitlicher Bewegungsfreiheit des Insassen (geräumigeres Fahrzeug oder stoßabgewandte Sitzposition) geeignet. Eine isolierte Belastung der Halswirbelsäule ist bei leichten Kollisionen im geschlossenen Fahrzeug zeitlich vor dem Kopf- oder Schulterkontakt nicht zu erwarten. Der weitere Bewegungsablauf nach dem Zeitpunkt des ersten Kontaktes wird durch die Raumverhältnisse im Fahrzeug bestimmt. Im allgemeinen ist die Schulterfreiheit geringer als die seitliche Kopffreiheit, so daß die Schulter bereits vor dem Kopf mit Fahrzeugteilen in Berührung kommt.

Bei zehn hier exemplarisch vermessenen Fahrzeugen lag die mittlere Schulterfreiheit zur Türverkleidung bei 9 cm, während der seitliche Kopffreiraum im Mittel 20 cm betrug.

Zum Vergleich der Belastung aus Fahrzeug- und Schlittenkollision dient das Diagramm der Beschleunigungsverläufe in **Bild 7**. Die Werte der Querbeschleunigung des Schlittens liegen zu jedem Zeitpunkt deutlich über denen der Fahrzeugkollision. Die Bildsequenz des Schlittenversuchs in **Bild 8** zeigt, daß sich der Proband auch bei der höheren Belastung auf dem Schlitten zwar mit der Schulter, nicht aber mit dem Kopf über die Fahrzeugkontur hinausbewegt.

Da die Belastung durch die Fahrzeugkollision erheblich geringer ist als die Belastung im Schlittentest, kann ein Anstoß des Fahrzeuginsassen

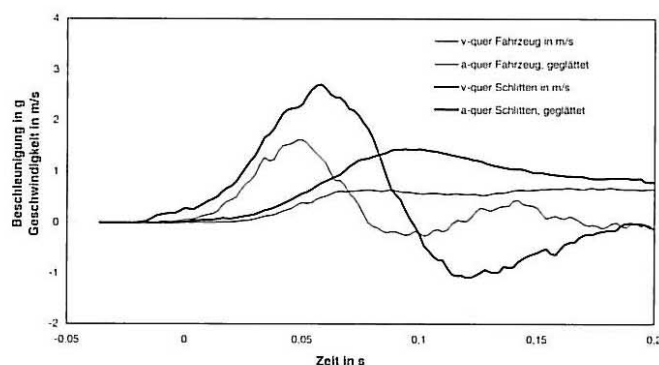


Bild 7 Belastung bei Schlittenversuch und Fahrzeugkollision im Vergleich
Fig. 7 Comparison of stress in sledge test and vehicle collision

mit dem Kopf an der B-Säule oder der Seitenscheibe mit hoher Wahrscheinlichkeit ausgeschlossen werden. Ein leichter Schulterkontakt an der Tür ist nicht auszuschließen. Kommt es zum Schulteranprall, so wird der Oberkörper des Insassen auf Fahrzeugquergeschwindigkeit beschleunigt. Der Kopf hat zu diesem Zeitpunkt noch keine Quergeschwindigkeit aufnehmen können. Unter den realen Bedingungen Fahrzeug ist dann mit einer kurzzeitigen seitlichen Halswirbelsäulenbelastung, zeitlich betrachtet zwischen dem Schulter- und dem Kopfanprall zu rechnen. In Analogie zur Heckkollision, bei der eine translatorische Bewegung im Sinne einer Rumpfbewegung relativ zum Kopf nach vorne auftritt [3], wäre dann auch bei der Seitenkollision eine translatorische Relativbewegung zu erwarten. Der Kopf hätte die Neigung, relativ zum Rumpf zur stoßzugewandten Seite zu gleiten. Wird bei der klassischen Heckkollision aufgrund der anatomischen Verhältnisse der Halswirbelsäule eine translatorische Bewegung bis zu einem gewissen Ausmaß vom Körper toleriert, so ist diese im Rahmen einer Seitenkollision bedingt durch den Aufbau der Halswirbelsäule. Der Kopf wird sich anschließend, abhängig von der einwirkenden Belastung, soweit zur Seite neigen, daß es insgesamt aufgrund der Körperbewegung in stoßzugewandter Richtung zu einem Kopfanprall kommt. Somit ist es also bei stoßzugewandten Seitenkollisionen, bei denen ein Schulter-/Kopfanprall auftritt, durchaus denkbar, daß es zu einer Verletzung sogar von Gelenkstrukturen der Halswirbelsäule kommen kann. Dies hängt jedoch von der einwirkenden Belastung ab. Auf jeden Fall kann unter diesen Umständen die noch weit verbreitete Meinung, daß die Halswirbelsäule bei einem Seitenaufprall nicht verletzt werden kann, nicht aufrecht erhalten werden. Auf jeden Fall sollte bei der Seitenkollision eine zusätzliche medizinische Beurteilung durchgeführt werden, insbesondere auch dann, wenn die Unfallanalyse einen Kopfanprall nicht ausschließen kann.

Aus Heckauffahrkollisionen ist bekannt, daß die Kopfstütze den besten Schutz vor Halswirbelsäulenverletzungen bietet, wenn ihr Abstand zum Kopf möglichst gering ist. Wenn sich die Verhältnisse auf den Seitenaufprall übertragen lassen, ergibt sich eine geringere Verletzungsgefahr der Halswirbelsäule für große Personen, weil ihr Abstand zur Fahrzeugseite geringer ist. Die Verletzungsgefahr für den Kopf selbst ist durch Anstoß an harte Fahrzeugteile allerdings erheblich größer als bei der gepolsterten Kopfstütze. Entscheidend ist dabei die Geschwindigkeit mit der der Kopfanstoß erfolgt. Ein geringer Abstand bedeutet einen frühen Kontakt zu Beginn der Kollision, wenn die Quergeschwindigkeit des Fahrzeugs noch klein ist. Der Insasse wird nach seinem Anprall an der Fahrzeugseite für die Zeit der Kollisionsdauer mit dem Fahrzeug gemeinsam weiterbeschleunigt. Da die Kollisionsdauer der Fahrzeuge mit ca. 0,1 s um ein Vielfaches länger ist als ein Kopfanstoß an die Seitenscheibe, stellt die mit dem Fahrzeug gemeinsam erfolgende Beschleunigung für den Kopf des Insassen eine geringere Belastung dar, als ein späterer Kopfanstoß mit der vollen Fahrzeugquergeschwindigkeit. Ein Insasse mit geringerem Seitenabstand und entsprechend frühzeitigem Kopfanstoß erfährt unter diesen Umständen eine geringere Belastung als ein Insasse mit größerem Seitenabstand. Noch geringer ist die Kopfbelastung jedoch für den Fall eines besonders großen Abstands, wenn der Kontakt ganz vermieden wird.



Bild 8 Schlittenversuch, Bildabstand: 0,08 s, Belastungsdauer: 0,10 s, mittlere Beschleunigung: 14 m/s^2 , Geschwindigkeitsänderung: 5 km/h

Fig. 8 Sled test, time between frames: 0,08 s, stress duration: 0,10 s, mean acceleration: 14 m/s^2 , change in speed: 5 km/h

7 Seitliche Kopf- und Schulterfreiheit in verschiedenen Fahrzeugen

Für die Frage, ob ein stoßzugewandt sitzender Fahrzeuginsasse seitlich an Fahrzeugbauteilen anstößt oder nicht, hat die Kollisionsgeschwindigkeit des gestoßenen Fahrzeugs keine Bedeutung. Die kollisionsbedingte Querbeschleunigung des seitlich getroffenen Fahrzeugs ist von seiner Geschwindigkeit in Längsrichtung unabhängig. Der seitliche Kopf- und Schulterraum wird in der gleichen Zeit und mit der gleichen Geschwindigkeit aufgezehrt, wie bei einem stehenden Fahrzeug. Im Unterschied zum stehenden Fahrzeug kann der Insasse des fahrenden Fahrzeugs aber einer zusätzlichen Beschleunigung in Längsrichtung ausgesetzt sein. Während der Kollision wirkende Reibungskräfte zwischen den Fahrzeugen, gegebenenfalls ein Bremsvorgang und das Verhaken der Fahrzeuge, führen zu einer Verzögerung des gestoßenen Fahrzeugs längs seiner Fahrtrichtung. Der Insasse führt infolge dieser Verzögerung, soweit die fahrzeugeigenen Rückhaltesysteme dies zulassen, eine relativ zum Fahrzeug nach vorn gerichtete Bewegung aus. Die nach vorn gerichtete Bewegung überlagert sich mit der seitlichen Bewegung zu einer schräg nach vorn gerichteten Resultierenden. Abhängig von der Fahrer-Fahrzeug-Kombination ergibt sich aus der Vorverlagerung des Insassen ein veränderter seitlicher Bewegungsfreiraum. Sitzt der Fahrzeuginsasse in normaler Sitzposition mit dem Kopf neben der B-Säule, so vergrößert sich sein seitlicher Bewegungsfreiraum durch die Vorverlagerung auf das entsprechende Maß bis zur weiter außen liegenden Seitenscheibe. Der für die seitliche Bewegung zwischen Pkw-Insasse und Fahrzeugbauteilen zur Verfügung stehende Raum wird durch folgende Parameter bestimmt:

Fahrzeugabhängige Parameter:

- Innenkontur der Fahrgastzelle
- Beschaffenheit des Sitzes
- Sitzeigenschaften

Insassenabhängige Parameter

- Größe/Konstitution des Pkw-Insassen
- Sitzposition des Pkw-Insassen im Fahrzeug
- Sitzhaltung des Pkw-Insassen auf seinem Sitzplatz

Um Anhaltswerte zur seitlichen Kopffreiheit zu erhalten, wurden verschiedene Fahrzeuge mit 3 unterschiedlich großen Personen besetzt. Die Versuchspersonen nahmen jeweils auf dem Fahrersitz Platz. Sie wurden aufgefordert, den Sitz so einzustellen, als ob sie zu einer Fahrt mit dem jeweiligen Fahrzeug starten wollten. An der Stelle des geringsten horizontalen Abstandes zwischen Fahrzeuginnenraumkontur und Kopf bzw. Schulter des Probanden wurde die Entfernung gemessen. Die fahrzeug- und insassenabhängigen Parameter haben erheblichen Einfluß auf diese Werte. Zur Orientierung kann angegeben werden, daß der seitliche Freiraum zwischen dem Kopf eines 178 cm großen Fahrers und der Seitenscheibe eines Mittelklasse Pkw in der Größenordnung von 15 bis 25 cm liegt.

Die seitliche Kopf- und Schulterfreiheit im Pkw wird im allgemeinen mit zunehmender Größe des Insassen geringer. Der Unterschied beruht auf der zum Dach hin verjüngten Fahrzeugform. Dieser Effekt zeigt sich insbesondere bei einigen modernen Fahrzeugen, die aus aerodynamischen Gründen ein schmales Dach haben und entsprechend schräge seitliche Fensterflächen aufweisen. Der Gebrauch einer Sitzhöhenverstellung gleicht die Werte teilweise aneinander an. Während der $1,68 \text{ m}$ große Fahrer im Ford Sierra noch 20 cm Abstand zur Seitenscheibe hat, sind es bei einer $1,90 \text{ m}$ großen Person nur noch 14 cm . Für eine Person dieser Größe muß im Sierra, wie in den meisten anderen Pkw, außerdem ein Anstoß an den Dachlängsträger in Betracht gezogen werden; der Abstand zum Dachlängsträger im Sierra beträgt in diesem Fall 6 cm . Im Einzelfall ist für die betreffende Fahrer-Fahrzeug-Kombination der Kopf- und Schulterfreiraum mittels Sitzprobe zu ermitteln.

8 Kopfanstoß im Fahrzeug

Die Kopfanstoßgeschwindigkeit läßt nur dann einen Schluß auf das Verletzungsrisiko zu, wenn Materialeigenschaften und Masse des Körpers, an dem der Anstoß erfolgt, bekannt sind. Für Insassen bei seitli-

chen Pkw-Kollisionen kommen als Anstoßpunkte Seitenscheibe, Dachholm, B-Säule und eventuell A-Säule in Betracht. Je größer die Geschwindigkeit und je steifer die Anprallstelle, desto höher ist die Anprallintensität.

Die Fahrzeugseitenscheiben werden im geschlossenen Zustand durch Führungsschienen im Scheibenrahmen der Türen seitlich fixiert. Das Widerstandsmoment des Scheibenrahmens gegen seitliche Belastung ist gering. Bei geschlossener Tür drückt der Scheibenrahmen gegen Dichtgummis im Türrahmen. Kräfte, die vom Fahrzeuginnenraum auf die Seitenscheibe gerichtet sind, müssen allein vom Scheibenrahmen aufgenommen werden. Sie biegen den Scheibenrahmen nach außen. Schon bei einem leichten Kopfanprall bewegen sich Scheibe und Rahmen im Anstoßbereich sichtbar einige Millimeter zur Seite. Der Anstoß an die Seitenscheibe eines Pkw und der Anstoß an einen Laternenpfahl oder eine massive Wand unterscheiden sich daher erheblich. Im Fahrzeug bleiben höhere Anstoßgeschwindigkeiten ohne Verletzungsfolge.

Ein Anstoß an den ungepolsterten Dachholm oder die B-Säule birgt ein höheres Verletzungsrisiko für den Kopf, als der Anstoß an die Seitenscheibe. Im Gegensatz zur Seitenscheibe geben die metallenen Trägerprofile der Fahrgastzelle beim leichten Kopfanstoß nicht nach. Durch den an der B-Säule bei vielen Fahrzeugen hervorstehenden Gurtumlenkbeschlag können zusätzliche Verletzungen auftreten. Wesentlich gemildert wird der Anstoß durch eine energieabsorbierende Verkleidung der betreffenden Fahrzeugteile.

9 Ausblick

Für weitere Erkenntnisse erscheinen vor allem Versuche mit Probanden in Fahrzeugen interessant. Dabei müssen nicht unbedingt beide Fahrzeuge in Bewegung sein.

Als Alternative zu Fahrzeugkollisionen ist die Erweiterung des Versuchsschlittens mit einer Fahrertür denkbar. Um die Sicherheit der Probanden nicht zu gefährden, sollte parallel zu früheren Studien möglichst eine Belastung erfolgen, wie sie auch im Freizeitbereich, z.B. bei Autoskookerkollisionen [3, 8, 9 - 11] ohne Verletzungen ertragen wird.

Um die Bedeutung der gemessenen Belastungen insbesondere des Kopfanpralls besser begreiflich zu machen, eignen sich Parallelen zu »Alltagssituationen«. So erleidet ein unachtsamer Spaziergänger beim Zusammenprall mit einer Straßenlaterne einen Kopfanstoß mit ca. 6 km/h. In diesem Zusammenhang von Interesse wäre auch die Messung von Kopfbelastungen im Boxsport, der Belastung eines Fußballspielers beim Kopfball usw.

10 Fazit

Alle Testpersonen blieben bei den Versuchen unverletzt und äußerten weder unmittelbar danach, noch später Beschwerden. Zusammenfassend ist festzustellen, daß eine seitliche Fahrzeugquerbeschleunigung, die nicht geeignet ist, einen Kopfanstoß des stoßzugewandt sitzenden Pkw-Insassen zu verursachen, höchstwahrscheinlich auch keine Verletzung der Halswirbelsäule erwarten läßt.

Die Videobildsequenzen der Schlittenversuche zeigen, daß bei seitlichen Kollisionen oberhalb einer Geschwindigkeitsänderung von 5 km/h quer zur Fahrtrichtung ein leichter Kopfanstoß möglich ist.

*1 Ca. 0,1 s, in Extremfällen 0,05 bis 0,2 s

Literaturnachweis

- [1] Aswegen van A. (1998): Die biomechanische Belastung bei leichten Pkw-Seitenkollisionen, Diplomarbeit, Bergische Universität Gesamthochschule Wuppertal
- [2] Bührmann R. (1997): Experimentelle Untersuchung der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung zur Bestimmung der biomechanischen Belastung. Diplomarbeit, Fachhochschule Osnabrück
- [3] Castro W. H. M., Schilgen M., Meyer S., Weber M., Peuker C., Wörtler K. (1997): Do »whiplash injuries« occur in low-speed rear impacts?, Eur Spine Journal 6:366-375, Springer Verlag

- [4] Deutscher C. (1994): Bewegungsablauf von Fahrzeuginsassen beim Heckaufprall, Eurotax (International) AG, CH-8807 Freienbach
- [5] Europ. Wiss. Arbeitskreis (1997): Versuche zur Belastung der HWS bei kleinen Seitenanstoßen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, Heft 12/97, S. 328 - 332. Verlag Information Ambs GmbH, Kippenheim
- [6] Holthöfer (1982): Verletzungsschwelle im HWS-Bereich bei Pkw-Kollisionen, Diplomarbeit, München
- [7] Kalthoff W. (1997): Experimentelle Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen der Bestimmung der Insassenbewegung auf der Grundlage der Fahrzeugbeschädigungen nach Pkw-Aufprallkollisionen. Diplomarbeit, Fachhochschule Osnabrück
- [8] Meyer S. (1993): Experimentelle Untersuchung des Zusammenhangs zwischen technischen Kollisionsparametern und der Bewegungskinetik von Insassen im Hinblick auf leichte HWS-Schleudertraumen. Diplomarbeit, Institut für Kraftfahrwesen der Universität Hannover
- [9] Meyer S., Hugemann W., Weber M. (1994): Zur Belastung der Halswirbelsäule durch Aufprallkollisionen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 32, 1994, S. 15 - 21 und S. 187 - 199. Verlag Information Ambs GmbH, Kippenheim
- [10] Meyer S., Weber M., Schilgen M., Castro W. H. M. (1998): The Minimal Collision Velocity for Whiplash. Whiplash Injuries: Current Concept in Prevention, Diagnostics and Treatment of the Cervical Whiplash Syndrome. Edited by Robert Gunzburg and Marek Szpalski. Lippincott-Raven Publishers, Philadelphia
- [11] Meyer S., Weber M., Kalthoff W., Schilgen M., Castro W. H. M. (1999): Freiwilligen-Versuche zur Belastung der Halswirbelsäule durch Pkw-Heckanstoße. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, 37, S. 13 - 24. Verlag Information Ambs, Kippenheim
- [12] McConell W. E., Howard R. P., Guzman H. M., Bomar J. B., Benedict J. V., Smith H. L., Hatsell C. P. (1993): Analysis of Human Test Subject Kinematic Responses to Low Velocity Rear End Impacts, SAE Technical Paper Series 930889, Warrendale USA
- [13] Scott M. W., McConell W. E., Guzman H. M., Howard R. P., Bomar J. B., Smith H. L., Benedict J. V., Raddin J. H., Hatsell C. P. (1993): Comparison of Human and ATD Head Kinematics During Low-Speed Rear-End Impacts. SAE Technical Paper Series 930094, Warrendale, USA
- [14] Severy D. H., Mathewson J. H., Bechtol C. D. (1955): Controlled Automobile Rear-End Collisions, An investigation of Related Engineering and Medical Phenomena, Canadian Services Medical Journal 11, S. 757 - 759
- [15] Steffan H., Geigl. B. (1996): Zur Problematik von HWS-Verletzungen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 34, S. 35 - 39. Verlag Information Ambs GmbH, Kippenheim
- [16] Szabo T. J., Welcher J. B., Anderson R. D., Rice M. M., Ward J. A., Paulo L. R., Carpe N. J. (1994): Human Occupant Kinematic Response to Low Speed Rear-End-Imp. SAE Paper 940532. Publ. by Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, PA/USA
- [17] Szabo T. J., Welcher J. B. (1996): Human Subject Kinematics and Electromyographic Activity During Low Speed Rear Impacts. SAE Paper 962432. Publ. by Society of Automotive Engineers, Inc., Warrendale, PA/USA
- [18] West D. H., Gough J. P., Harper G. T. K. (1993): Low Speed Rear-End-Collision Testing Using Human Subjects, Accident Reconstruction Journal, May/June 1993