

Übersichtsreferat — Review Article

Entstehungsweise der Verletzungen von Fahrern und Beifahrern frontal kollidierender Kraftfahrzeuge

Gerhard E. Voigt, Wolfgang Lange und Günther Dotzauer

Institut für gerichtliche Medizin, Universität Lund (Schweden)

Max-Planck-Institut für Arbeitsmedizin, Dortmund

Institut für gerichtliche Medizin, Universität Köln (BRD)

Eingegangen am 8. August 1973

The Causal Mechanism of Injuries to Drivers and Passengers in Motor Cars Involved in Head-on Collisions

Summary. To elucidate the causal mechanism of the main bodily injuries to unbelted drivers and front-seat passengers in motor cars involved in head-on collisions, the results at autopsy were compared to the findings made during the investigation of the cars. The injury pattern depends on the design and the deformation of the car body. The investigation shows, that the trunk of the driver should be kept in the upright position when it is thrown against the steering wheel and the panel in order to minimize injuries. The impact area should be as large as possible to prevent severe injuries. The steering column should not protrude into the passenger compartment. In order to prove the correctness of this theory some experiments with unembalmed cadavers were performed on the impact sled. In other experiments aortic ruptures were produced in cadavers by a blow to the lower part of the anterior chest wall. The intraaortic pressure has been measured in these experiments and the aorta seems to tolerate not more than 1200 mm Hg (dynamic load).

The reconstruction of the "secondary collision" of front-seat passengers indicates, that the best protection against severe injuries can be obtained by maintaining the trunk in the upright position. The impact area (panel) should be as large as possible. The panel (dashboard) should have such a design as to prevent, in case of head-on collision, trauma to the neck of the passenger which would result in an angular acceleration of the head. Experiments with unembalmed cadavers on the impact sled have shown that it is possible to protect the front-seat passenger from injuries in head-on collisions at about 50 km/hr with appropriate panel design.

Zusammenfassung. Zur Klarlegung des Entstehungsmechanismus' der wesentlichsten Körperverletzungen bei nicht durch Gurte geschützten Fahrern und Beifahrern auf dem Frontsitz frontal kollidierender Personenkraftwagen wurden die Befunde bei den Sektionen mit denen an den Unfallfahrzeugen verglichen. Zur Vermeidung schwerer Verletzungen sollte der Rumpf der Fahrzeuginsassen beim Aufprall gegen Lenkung oder Armaturenbrett seine aufrechte Stellung beibehalten und die Aufschlagfläche an der Rumpfvorderseite so groß wie möglich sein. Es muß weiterhin vermieden werden, daß der Kopf beim Aufschlag einer rotatorischen Beschleunigung, eventuell verbunden mit einer Traktion des Halses, ausgesetzt wird. Die Beobachtungen bei Unfallanalysen wurden durch experimentelle Untersuchungen unter Verwendung von nicht einbalsamierten Leichen am Katapultschlitten bestätigt.

Key words: Frontalzusammenstoß, Verletzungen — Traumatologie, Verletzungen bei Frontalzusammenstoß — Aortaruptur.

Durch Verkehrsunfälle entstehende Körperverletzungen sind nicht nur von großem volkswirtschaftlichen Interesse, sie belasten darüber hinaus, personell wie

rationell, die Einrichtungen der Krankenpflege vom Notfallkrankenhaus bis zum Rehabilitationszentrum.

Im Kampf gegen die Unfallursachen wurden Probleme des jungen wie alten Verkehrsteilnehmers, des Gesunden wie des Kranken als auch des Verkehrsteilnehmers unter Fremdstoffeinwirkung (Medikament etc. und/oder Alkohol) seit Jahren diskutiert. Es wurden Forderungen aufgestellt, die in jüngster Zeit in steigendem Maße die „innere Sicherheit“ der Unfallfahrzeuge betreffen.

Konstruktionsveränderungen zugunsten der inneren Sicherheit sollen nicht vom Reißbrett aus vorgenommen werden. Primär ist die Frage zu stellen, wie die verschiedenen Körperverletzungen bei den Insassen kollidierender Fahrzeuge entstehen und welche Abhängigkeiten von der inneren Gestaltung eines Kraftfahrzeuges bestehen. Dabei stößt man auf Fragen, denen bislang wenig nachgegangen wurde, wie z. B. nach der Deformierung des menschlichen Körpers beim Aufprall oder nach der Toleranzgröße der verschiedenen Körpergewebe und damit auch der Körperteile gegenüber den unterschiedlichen, während eines Unfallherganges einwirkenden Kräften. Im wesentlichen wurden bisher Aufprallversuche unter Verwendung anthropometrischer Dummies zur Ermittlung sowohl des Bewegungsablaufs als auch der Verzögerungen und Kräfte durchgeführt, denen ein Körper während eines Unfalltraumas ausgesetzt ist. Modellversuche sind aber nur begrenzt aussagefähig; sie geben keine Hinweise über die äußere, noch weniger über die innere Verformung des Körpers beim Aufprall auf verschiedene Karosserieteile. Dummies sind daher nur eine schlechte, für unsere Fragestellungen unzureichende Imitation des menschlichen Körpers.

Eine weitere Methode zur Aufschlüsselung der Entstehungsweise von Unfallverletzungen ist neben dem Aufprallversuch die genaue Analyse von Verkehrsunfällen, speziell denen mit Todesfolge. Dabei werden die Sektionsergebnisse in allen Einzelheiten erfaßt und mit den Befunden am Unfallfahrzeug verglichen.

Am Institut für gerichtliche Medizin Lund wurden in den vergangenen Jahren etwa 800 Unfälle untersucht, bei denen Pkw-Insassen, die nicht durch Gurte geschützt waren, tödlich verunglückten.

Die äußeren, bei der Sektion erhobenen Befunde wurden an einer einfachen Puppe markiert und diese in den Unfallwagen plaziert. Man erhält dadurch ein Verständnis für das Geschehen bei der sogenannten „second collision“. Um einen weiteren Einblick in die Entstehungsweise der Unfallverletzungen bei der angegebenen Unfallsituation zu erhalten, wurden am Katapultschlitten des Max-Planck-Institutes für Arbeitsphysiologie in Dortmund Experimente mit nicht einbalsamierten Leichen durchgeführt. Im folgenden wird zusammenfassend über die Ergebnisse der Untersuchungen in Lund, Dortmund und Köln von Fahrern wie Beifahrern auf dem Frontsitz bei frontalen Kollisionen berichtet.

1. Verletzungsmechanismen beim Fahrer

Das Untersuchungsgut besteht aus etwa 120 Fällen.

1.1. Schaufeleffekt am Thorax

Etwa 35% aller Fahrer kommen bei einem frontalen Zusammenstoß durch eine Aortaruptur an klassischer Stelle ums Leben, d. h., die Aortaruptur befindet sich

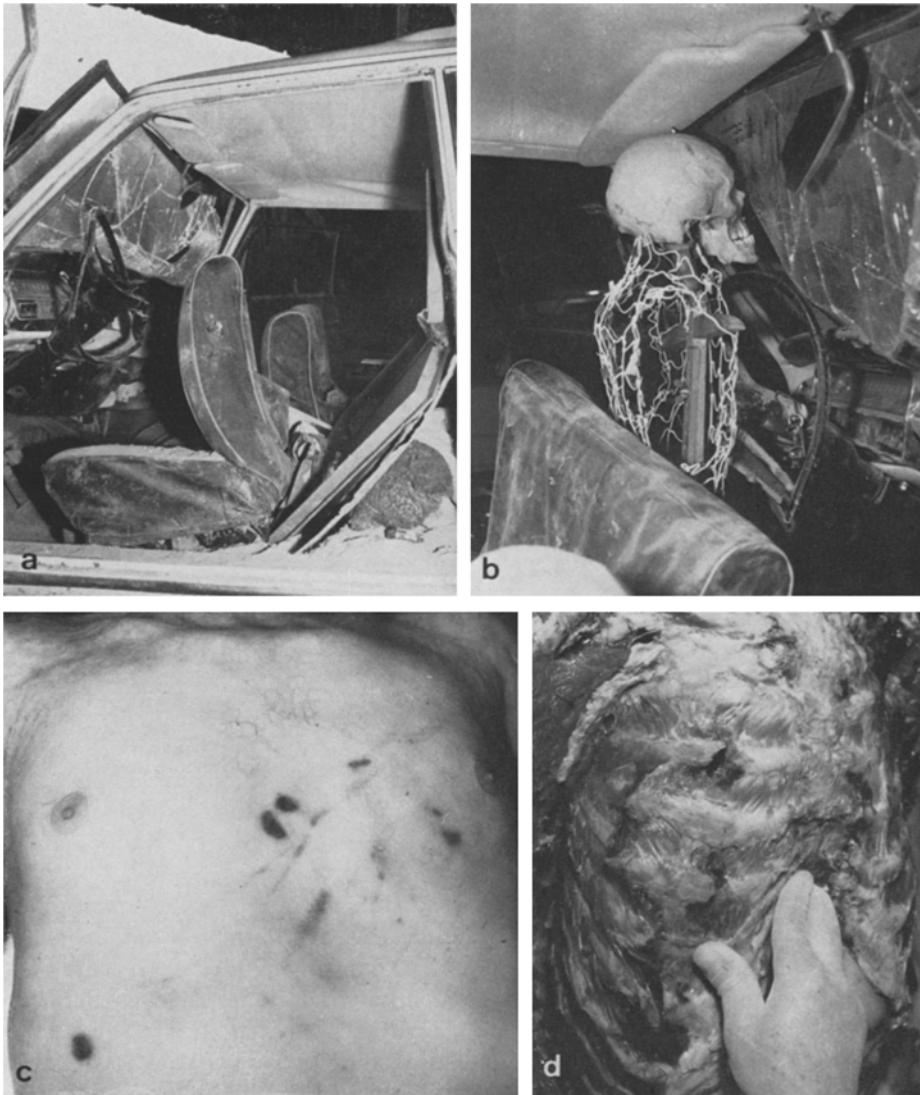


Abb. 1 a—d. Rekonstruktion der „second collision“ mit einer einfachen Puppe bei einem frontalen Zusammenstoß. Typische Deformierung der Lenkung mit Bruch der nach unten gerichteten Speiche (a u. b). Äußere Verletzungen (c) an der vorderen Brustwand (Lenkradspeiche). Sternum- und Rippenfrakturen. Unterer Teil der vorderen Brustwand kann leicht imprimiert werden. Tod durch Aortaruptur an klassischer Stelle

im allgemeinen dicht unterhalb der Insertion des Lig. arteriosum Botalli und in einigen Fällen dicht unterhalb des Abganges der A. subclavia sin. (Voigt). Charakteristisch sind — außer bei Jugendlichen mit einem elastischen Thorax — multiple Rippenbrüche in den vorderen Axillarlinien sowie Frakturen oder Infraktionen des Sternum in Nähe der Symphysis sterni. Auffallend sind weiterhin transversal ver-

laufende Frakturen einer oder mehrerer der oberen 3 Rippenpaare lateral der Knorpel-Knochen-Grenze. Der untere Teil der vorderen Thoraxwand läßt sich meist leicht imprimieren. Das Trauma greift in diesen Fällen caudal der Mitte des Sternum an. Je nach dem Niveau der Gewalteinwirkung wird das Herz von dem unteren Teil der imprimierten vorderen Brustwand erfaßt und nach Abriß von der caudalen Verankerung (V. cava inf., evtl. auch von der V. und A. pulmonalis) in den Arcus aortae hineingepreßt. Es kommt dabei zu einer Deflektion des cranialwärts verschobenen Arcus aortae, wie Versuche unter statischen Bedingungen an der Leiche ergeben hatten (Voigt). Es sind Folgen eines sogenannten Schaufel-effekts. Die Deflektion und die cranialwärts gerichtete Dislokation des Arcus aortae führt zu einer Zerrung im Bereich der Insertion des Lig. arteriosum Botalli. Inwieweit eine intraaortale Drucksteigerung als Folge einer Kompressionsstauung zu der Aortaruptur beiträgt, muß experimentell untersucht werden.

In den Fahrzeugen zeigt sich stets etwa das gleiche Bild: Der nach unten gerichtete Teil des Lenkradkranzes ist nach vorn gebogen (Aufschlag des Rumpfes des Fahrers). Die hauptsächliche Gewalteinwirkung wird über den unteren Teil der Lenkradnabe oder die Bruch- oder Biegungsstelle einer im allgemeinen auf den Fahrer zu gerichteten Speiche auf die Brustvorderwand vermittelt.

Um der Gefahr dieser schweren intrathorakalen Verletzungen entgegenzutreten, hat man während der letzten Jahre die Lenksäulen mit energieaufnehmenden, deformierbaren Elementen versehen, die zweifellos in vielen Fällen einen guten Effekt haben. Bei mehreren dieser Konstruktionen hat man jedoch leider nicht Vorsorge getroffen, daß Brüche oder Verbiegungen der Lenkradspeichen verhindert werden. Diese Gefahr besteht stets dann, wenn sich nur ein Teil der Lenkung an die Vorderseite der aufprallenden Brust anlegen kann. In diesem Fall können schwere intrathorakale Verletzungen, auch Aortarupturen, auftreten (s. Abb. 1), da das Trauma über die Bruch- oder Biegungsstelle der Speiche auf die Brustvorderwand konzentriert überführt wird.

Eine wesentliche Voraussetzung für das Zustandekommen des Schaufeleffektes liegt darin, daß der untere Teil des Rumpfes des Fahrers infolge von Trägheitskräften unter die Lenkung bzw. das Armaturenbrett gerissen wird. Dies ist dann der Fall, wenn die Kniegelenke nicht am Armaturenbrett aufprallen, sondern erst an der Spritzwand, oder aber, wenn Femurfrakturen nach Aufprall der Kniegelenke gegen das Armaturenbrett entstanden sind. Der Rumpf kippt bzw. knickt um die Aufschlagstelle der Brustvorderwand gegen die Lenkradnabe, wodurch die nach cranial-dorsal gerichtete Kraffteinwirkung an der vorderen Brustwand zustande kommt.

1.2. Sagittale Impression der vorderen Brustwand

Diese Situation tritt vor allem auf, wenn der aus seiner Verankerung gerissene Fahrersitz mit dem Fahrer nachschleudert oder aber die Kniegelenke gegen das Armaturenbrett prallen und Femurfrakturen nicht auftreten. Dadurch wird verhindert, daß die Beckenpartie des Fahrers unter das Instrumentenbrett gerät, d. h., der Rumpf kippt nicht um die Anschlagstelle der Brust (Lenkradnabe). In diesem Fall hat das Trauma gegen den Rumpf eine sagittale Richtung und ist besonders dann gefährlich, wenn die Gewalteinwirkung über die Lenkradnabe oder eine Biegungs- oder Bruchstelle einer Speiche auf einen kleinen Bezirk der Brust-

vorderwand übertragen wird. Wurde der untere Teil der vorderen Brustwand nahe der Mittellinie getroffen, zeigen die entstehenden Rippen- und Sternumfraktur zwar ein ähnliches Bild wie in Fällen mit einem Schaufeleffekt, es fehlen jedoch Aortarupturen an klassischer Stelle. Rupturen der Aorta ascendens, Perikard- und Herzrupturen (Herzohren, Lacerationen oft im Bereich des Sulcus interventricularis ant. infolge eines Einschneidens der Rupturkanten des Perikards oder des häufig isolierten N. phrenicus) werden dagegen registriert. Der Entstehungsmechanismus dieser Verletzungen liegt in der Kompression des Thorax mit Dislokation des Herzens nach links caudalwärts. Außerdem können komplette wie inkomplette Rupturen bzw. Dehnungsriss der Intima der Aorta descendens vorkommen: Die Aorta wurde zwischen Brustvorder- und -rückwand komprimiert und links der Wirbelsäule verschoben. Leber-, aber mitunter auch Milzrupturen sind bei dieser Situation übliche Befunde.

In den bislang geschilderten Gruppen (1.1 und 1.2.) sind Verletzungen von Kopf und Halswirbelsäule sehr selten.

1.3. *Traktionseffekt am Kopf*

Wenn die Lenksäule durch den auf die Lenkung aufschlagenden Fahrer nach vorn (und damit das Lenkrad nach vorn oben) gehiebt wird und die Kniegelenke gegen das Armaturenbrett prallen, kann das Gesicht des Fahrers (Kinn, Oberkiefer, Nasenwurzel) gegen den oberen Teil des Lenkradkranzes schlagen. Traktionsverletzungen an der Schädelbasis (komplette oder inkomplette Ringfrakturen) oder der oberen Halswirbelsäule (Abrisse des vorderen Längsbandes der Halswirbelsäule, Zerfetzungen der Zwischenwirbelscheiben und marginale Abrisse an der ventralen Seite der Wirbelkörper) finden ihre Deutung. Die Entstehungsweise dieser Verletzungen ist jedoch nicht voll geklärt. Es ist denkbar, daß sie die Folge einer Zerrung sind, wobei das Gesicht an der Lenkung „hängen“ bleibt, während die Oberschenkel nach Aufprall der Kniegelenke das Becken und damit den gesamten Rumpf abwärts hebeln. Verbiegungen der unter dem Sitzkissen befindlichen Querleiste an der Vorderseite des Sitzes (oder der unter dem Sitz befindlichen Gleitschienen) beweisen, daß das Gesäß gewaltsam in den Sitz hineingepreßt worden ist.

1.4. *Effekt der in das Fahrzeuginnere eingeschobenen Lenksäule*

Dies kommt in modernen Fahrzeugen glücklicherweise nur noch sehr selten vor, ist jedoch in älteren Modellen oft zu beobachten. Je nach der Höhe der eingeschobenen Lenkung schlägt entweder der obere Teil der Brustvorderwand oder das Gesicht des Fahrers auf die Lenkradnabe oder eine Speiche auf.

Wird der obere Teil der Thoraxvorderwand getroffen, können lokale Impressionen mit Rupturen des Truncus brachiocephalicus oder des Arcus aortae resultieren.

Der Körper des Fahrers kann in solchen Fällen von der eindringenden Lenkung hochgehoben werden, so daß der Kopf gegen den oberen Rahmenteil der Windschutzscheibe prallt. Dies kommt sonst selten vor und wird nur beobachtet, wenn die Frontpartie des Fahrzeuges bei einem Unfall nach unten gepreßt wird (z. B. Unterfahrung eines anderen Fahrzeuges).

Die gefährlichste Situation liegt vor, wenn der Kopf gegen die eingeschobene Lenkung schlägt. Resultat: in erster Linie Ringfrakturen der Schädelbasis oder Abrisse des Os occipitale

(mit Frakturen der Kondylen) vom Atlas, aber auch Axisfrakturen und Verletzungen des Hirnstammes oder des oberen Rückenmarks.

Die gleichen Verletzungen sind aber auch zu beobachten, wenn auf Grund eines zu großen Abstandes des Sitzes von der Lenkung und bei zu hoch sitzendem Armaturenbrett die Möglichkeit geschaffen wurde, daß der Fahrer unter das Armaturenbrett geschleudert wird.

1.5. Experimentelle Untersuchungen

Zusammengefaßt ergeben sich aus der Unfallanalyse folgende Forderungen:

a) Die Lenkung darf bei einem frontalen Aufprall nicht in das Fahrzeuginnere eindringen.

b) Der Rumpf des Fahrers muß die aufrechte Haltung stets beibehalten, um einen Schaufeleffekt an der vorderen Brustwand durch ein von caudal-ventral angreifendes Trauma zu vermeiden. (Es ist somit prinzipiell nicht richtig, die Anprallstelle für die Kniegelenke möglichst weit nach vorn unter das Armaturenbrett bis an die Spritzwand zu verlegen, wie es leider von extremitätschirurgischer Seite vorgeschlagen worden ist.)

c) Die Aufschlagstelle für die Brustvorderwand sollte so groß wie möglich sein; Brüche oder Verbiegungen der Lenkradspeichen dürfen nicht vorkommen.

Zur Überprüfung dieser These wurden Aufprallversuche mit nicht einbalsamierten Leichen durchgeführt, wobei die Bewegungsabläufe, Beschleunigungen und Kräfte zahlenmäßig erfaßt werden konnten. Bei der danach durchgeführten Obduktion wurden die beim Aufprall erhaltenen Verletzungen registriert.

Die Experimente wurden an der Katapultanlage des Max-Planck-Institutes für Arbeitsphysiologie Dortmund durchgeführt (Coermann *et al.*; Voigt u. Wilfert). Ein auf Kunststoffkufen gleitender Schlitten wurde über eine Strecke von 1 m von einer Geschwindigkeit 0 auf etwa 50 km/Std beschleunigt. Auf dem Schlitten befanden sich Teile einer Pkw-Fahrkabine mit einem Sitz, Lenkung, Armaturenbrett und Spritzwand. Die nicht einbalsamierte Leiche wurde auf den Sitz gesetzt. An Bord des Schlittens filmte eine Hochfrequenzkamera mit etwa 500 Bildern/sec den Stoßvorgang und die Reaktion des gestoßenen Systems. Die Blickrichtung der Leiche war entgegengesetzt zur Stoßrichtung, so daß ein Auffahrunfall simuliert wurde.

Es wurden die Kräfte an der Lenkung und an der Armaturentafel gemessen. Die Armaturentafel konnte in unterschiedlicher Höhe montiert werden und gewährte entsprechend mehr oder weniger Kniefreiheit. Außer Kräften und Beschleunigungen wurde versucht, den Druckanstieg in der vor dem Versuch mit Blut gefüllten Aorta zu registrieren. Hierzu wurde ein Ultra-Miniatur Pressure Sensor (Kulite) von der linken A. carotis commun. in den Isthmus aortae eingelegt und sämtliche von außen zugänglichen großen Arterien unterbunden (Aa. femor., axill., carotis comm.), wonach kurz vor dem Versuch die Aorta von der linken A. femor. mit einer Handpumpe mit Blut gefüllt wurde.

Während des Stoßes rutschte der Körper auf Grund seiner Massenträgheit in Richtung Lenkung und schlug entweder mit den Kniegelenken gegen die Armaturentafel oder bei hochsitzender Armaturentafel gegen die Spritzwand. Je nach der Lenkradkonstruktion waren die an der Leiche erzielten Verletzungen unterschiedlich:

Beim Stoß, der ein plötzliches Abbremsen von 50 km/Std zum Stillstand über einen Weg von 1 m (das ist etwa die Knautschzone eines Pkw) simulierte, traten Kräfte auf, die je nach Masse und Abmessungen des Körpers in der Größenordnung von 1000 kp an jedem Knieanschlag und zwischen 1300 und 2100 kp für den Thorax lagen.

Die Richtung der von den Knien beim Aufschlag gegen die Armaturentafel ausgeübten Kräfte verlief schräg nach oben, wie sich aus den großen Komponenten an den Meßstellen M 60 und M 61 im Gegensatz zu den Meßstellen M 56 und M 57 erkennen läßt (s. Abb. 2 u. 3). Dies ist durch die geometrische Lage des nach vorn gerutschten und an der Vorderkante des Sitzes tief in die Polsterung herabgedrückten Gesäßes sowie durch die an den Armaturentafeln arretierten Kniegelenke bedingt. Hierdurch entsteht eine Hebelwirkung, wodurch die über die

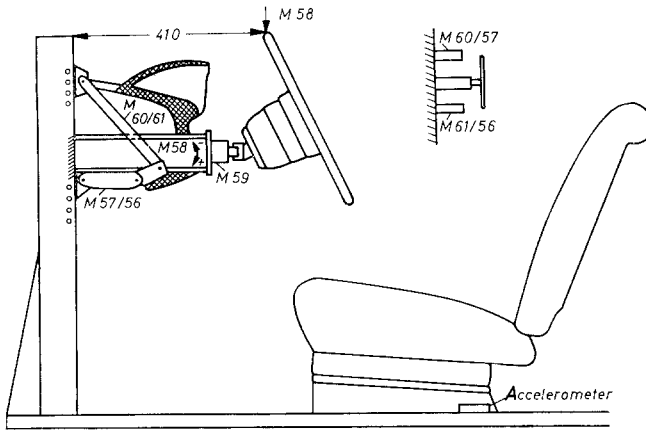


Abb. 2. Meßstellen am Schlitten

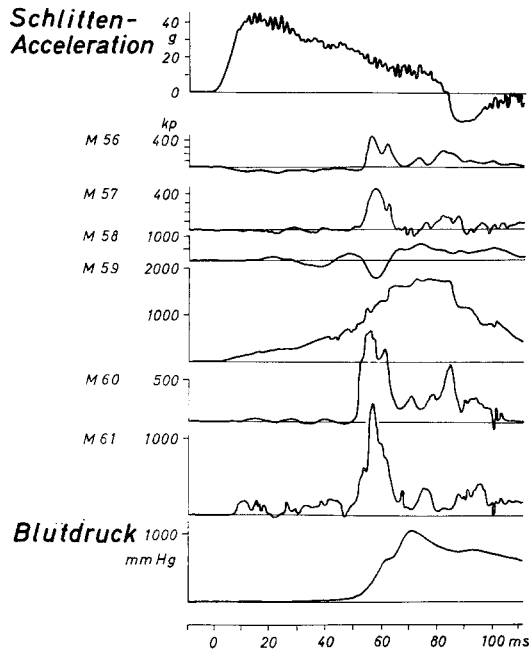


Abb. 3. Acceleration, Kräfte und intraaortaler Druck (Isthmus aortae), die bei einem Aufprallversuch registriert wurden. Lenkung ohne Dämpfungselement. Impression der vorderen Brustwand. Aortaruptur an klassischer Stelle

Oberschenkel auf die Armaturentafel übertragenen Massenkräfte des Körpers vergrößert werden.

Trotz der verhältnismäßig hohen Kraftspitzen, die allerdings nur wenige Millisekunden auf den Oberschenkel wirkten, trat nur einmal ein Bruch einer alten verheilten Femurschaftfraktur auf (Kraftmaximum 1400 kp über 10 msec) und in 1 Falle eine typische rechtsseitige Acetabulumfraktur (1150 kp an der Knieaufschlagstelle). In 2 weiteren Fällen wurden Patellafrakturen beobachtet (Kraftspitzen von 1300 bzw. 950 kp).

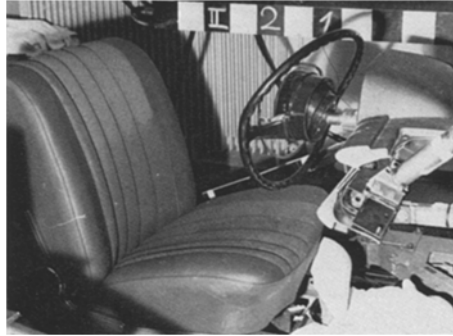


Abb. 4. Lenkung mit Dämpfungselement nach Aufprallversuch



Abb. 5. Lenkung ohne Dämpfungselement nach Aufprallversuch: Lenkradkranz mit Speichen von der Nabe abgebrochen

Von größtem Interesse bei diesen Versuchen war der Effekt verschiedenartiger Lenkungen (Abb. 4 u. 5).

Lenkräder mit kleiner Nabe und leicht brechbaren Speichen wirkten auf den aufschlagenden Thorax wie ein Rammpfahl, der von caudo-ventral her den unteren Teil der vorderen Brustwand imprimierte, während sich der untere Teil des Rumpfes infolge des zu hoch sitzenden Armaturenbrettes mit unverminderter Trägheitskraft nach vorn in Richtung Spritzwand verschob, an der die Beine aufschlugen. Es entstanden zahlreiche Rippenbrüche und Sternumfrakturen, die genau denen entsprachen, wie sie bei vergleichbaren Unfallabläufen des Alltags beobachtet werden. Außerdem resultierten Aortarupturen an der klassischen Stelle und Herzverletzungen.

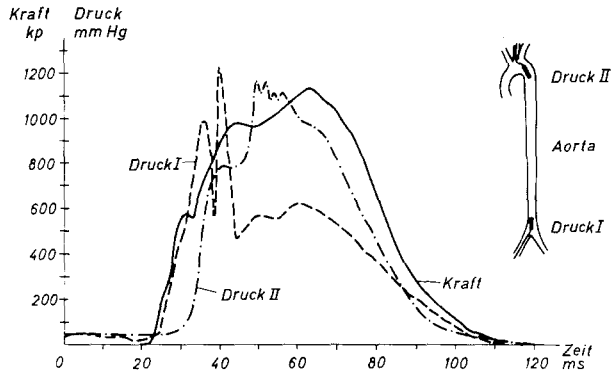


Abb. 6. Experiment an der Leiche. Schlag gegen unteren Teil der vorderen Brustwand. Kraft, registriert an der Platte (s. Text). Intraaortaler Druck. Die Aorta wurde vor dem Versuch von einer A. femoralis aus mit Blut gefüllt. Keine Aortaverletzung

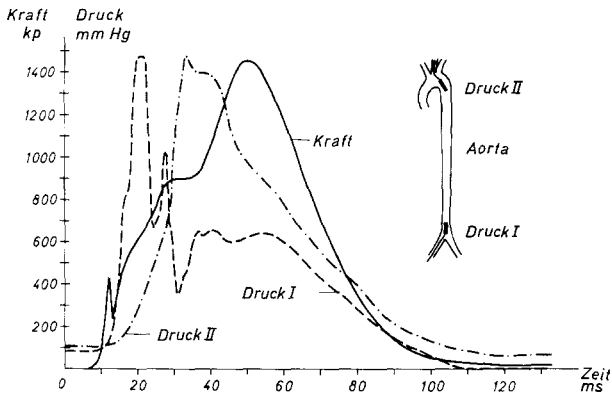


Abb. 7. Experiment an der Leiche. Gleiche Versuchsanordnung wie in Abb. 6. Aortaruptur an klassischer Stelle (s. Abb. 8)

Lenkräder, die jedoch unter der Nabe mit verformbaren Dämpfungselementen versehen waren, paßten sich der vorderen Brustwand an. In diesen Fällen wurden lediglich einige Rippenbrüche, dagegen keine intrathorakalen Verletzungen registriert.

Die Kräfte, die beim Aufschlag des Rumpfes gegen die Lenkung gemessen wurden, lagen in ihren Spitzenwerten zwischen 1280 und 1980 kp in Stoßrichtung sowie zwischen 150 und 1090 kp senkrecht zur Stoßrichtung. Während diese Kräfte bei Lenkungen mit einem deformierbaren Dämpfungselement und einer großen Nabe über eine verhältnismäßig große Fläche verteilt werden, sind sie bei kleinen Naben auf eine nur kleine Fläche konzentriert. In Fällen, bei denen durch Aufprall auf eine kleine Lenkradnabe Aortarupturen erzeugt wurden, stieg der intraaortale Druck im Isthmus aortae auf 1200 mm Hg, wobei allerdings einzuräumen ist, daß der Druckaufnehmer in direkten Kontakt mit der imprimierten vorderen Brustwand gekommen sein kann. Legte sich jedoch die Lenkung auf Grund des deformierbaren Dämpfungselementes der vorderen Brustwand breit an, wurden für den

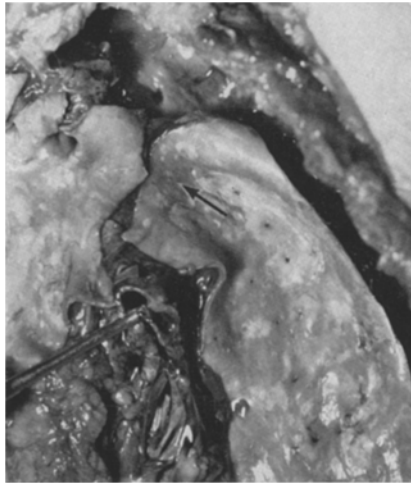


Abb. 8. Experimentelle Aortaruptur

intraaortalen Druck keine höheren Meßwerte als 350 mm Hg registriert. Ein derartiger Druck wird von der Aorta ohne weiteres vertragen.

Um eine Aussage darüber zu erhalten, ob die Aortaruptur an klassischer Stelle auf eine reine Zerrung über das Lig. arteriosum Botalli sowie eine Dislokation des Arcus aortae in cranialer Richtung auf einen Schaufeleffekt zu beziehen sind oder Folge einer intraaortalen Drucksteigerung ist (Lundevall), wurden Versuche (Lange u. Voigt) durchgeführt. Leichen wurden unter geringer Hochlagerung des unteren Teils des Körpers auf eine dicke Gummiplatte gelegt (ca. 15° gegenüber der Horizontalen). Gegen die untere Partie der Brustvorderwand wurde ein Schlag über eine runde Platte mit einem Durchmesser von 160 mm ausgeübt. Geschwindigkeit und Kraft wurden registriert. Ergebnis: Die Aorta tolerierte Druckspitzen bis zu etwa 1200 mm Hg bei einer dynamischen Belastung. Bei höheren Drücken wurden Aortarupturen an klassischer Stelle hervorgerufen. Gelegentlich wurde bei dieser Versuchsanordnung auch die Aorta abdominalis verletzt.

2. Verletzungsmechanismen beim Beifahrer

Das Untersuchungsgut besteht aus etwa 100 Fällen.

2.1. Impressionsfrakturen des Schädels

Impressionsfrakturen des Schädels wurden in dem untersuchten Material nur dann beobachtet, wenn der Kopf gegen metallische Strukturen des eigenen Fahrzeuges (oberer Rahmenteil der Windschutzscheibe oder angrenzendes Wagendach) bzw. gegen Fremdfahrzeuge (Unterfahmung von Lastkraftwagen) aufgeprallt war. Der Kopf schlägt nur dann gegen den oberen Rahmenteil der Windschutzscheibe, wenn entweder das Heck des eigenen Fahrzeuges bei der Kollision angehoben oder der Frontteil nach unten gedrückt wird (Unterfahmung von anderen Fahrzeugen). Impressionsfrakturen des Os frontale, bei etwas seitlicher Einwirkung aber auch

des Os parietale oder temporale, sind die Folgen. Die Kopfhaltung des Verunglückten im Augenblick des Aufpralles dürfte für die Art der Verletzungen ausschlaggebend sein. Schlägt die Schläfenregion gegen metallische Strukturen, entstehen als Torsionsfolge gelegentlich Ringfrakturen der Schädelbasis (Voigt u. Sköld), die von denen nach Traktionen schwer zu unterscheiden sind.

2.2. Hyperextensions- oder Schereffekt

Eine besondere Art der Kopfverletzungen stellen von ventral her beginnende Abrisse zwischen Schädelbasis und Atlas dar. Man sieht eine Zerreißung der Dura zwischen Foramen magnum occipitale und Atlas sowie mitunter Abrisse kleiner marginaler Bruchstücke des Clivus an der Vorderseite des Foramen magnum occipitale, gelegentlich durch Frakturen oder Infraktionen der Kondylen des Os occipitale. Charakteristisch sind dabei Schnitt-Platz-Wunden an der Kinns Spitze (Voigt u. Sköld). Die Rekonstruktion der Unfälle zeigt, daß die Verunglückten mit dem Kinn gegen den unteren Rahmenteil der Windschutzscheibe prallten, wobei in den Fahrzeugen die Windschutzscheibe dicht vor dem Armaturenbrett gelegen ist.

Die Entstehungsweise des Abrisses zwischen Schädelbasis und Atlas ist schwer anzugeben. Wahrscheinlich handelt es sich um Folgen einer Retroflexion des Kopfes. In diesen Fällen fehlten schwere intrathorakale oder intraabdominale Verletzungen.

Abrisse der Halswirbelsäule im Bereich des 2. Halswirbels (sogenannte Hangmans fractures) sind nur in 2 Fällen beobachtet worden. In einem der Fälle handelte es sich um ein Fahrzeug, dessen Motorhaube sich windschutzscheibenwärts öffnete. Die Kante der aufspringenden Motorhaube hatte das Gesicht der Verunglückten erfaßt, wie sich aus Blutspuren an der Haube folgern ließ. Das Gesicht schlug dann auf Fahrzeugteile, die sich zwischen Motorhaube und Rahmen befanden.

Ein Verunglückter war unter die Instrumententafel geschleudert worden und dabei offenbar mit dem Kinn an deren Oberseite hängengeblieben.

In 3 Fällen war der Hals gegen die in das Fahrzeuginnere vorspringende obere Kante der Instrumententafel aufgeschlagen, während der Kopf die Windschutzscheibe getroffen hatte. In sämtlichen Fällen resultierten Kehlkopfverletzungen und einmal zusätzlich eine Fraktur des Dens axis mit Verletzungen des Halsmarks.

2.3. Intrakranieller Schleudereffekt

Als Begleiterscheinung zu den unter 1 und 2 genannten Verletzungen aber auch separat und ohne Schädelfrakturen können durch Aufschlag des Gesichtes gegen die Windschutzscheibe und noch häufiger gegen das sich nach oben ausbeulende Dach oder das Armaturenbrett Abrisse von parasagittalen Brückenvenen auftreten. Äußerlich sieht man nur Hautabschürfungen, Platz- und Schnittverletzungen im Gesicht.

Schnittverletzungen sind dann besonders tiefgreifend und groß, wenn es sich um lamellierte Windschutzscheiben handelt, die von der zerbeulten Motorhaube zertrümmert sind, bevor sie von dem Kopf des Beifahrers getroffen werden. Der Aufschlag des Gesichtes gegen das zu hoch sitzende oder nach oben gehobene Armaturenbrett kann zu Le-Fort-Frakturen führen.

Der Abriß einzelner Brückenvenen ist bekanntlich Quelle subduraler Blutungen, während Abrisse zahlreicher oder sämtlicher Brückenvenen mit nur mikroskopisch nachweisbaren Hirnstamm- und Rückenmarkverletzungen (kleine Blutungen) kombiniert sind. Eine nennenswerte subdurale Blutung bildet sich nicht aus, auch wenn die Patienten einige Zeit im Respirator beatmet wurden (Voigt u. Saldeen). Zerrungen der Brückenvenen können zu lokalen subarachnoidalen Blutungen oder/und zu kleinen corticalen Blutungen in den Windungstälern sowie zu kleinen subcorticalen Blutungen führen (gliding contusions, Lindenberg). Die hieraus resultierenden Glianarben unterscheiden sich von Narben nach Rindenprellungsherden dadurch, daß in erster Linie die tieferen und nicht die peripheren corticalen Schichten befallen sind (Voigt). Die Brückenvenenabriss sind vermutlich die Folge einer rotatorischen Acceleration des Kopfes.

2.4. Schaufeleffekt am Thorax

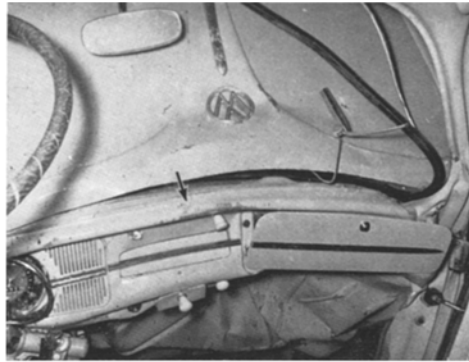
In gleicher Weise wie beim Fahrer können beim Beifahrer auf dem Frontsitz Brustverletzungen durch den Schaufeleffekt zustande kommen, wobei die untere Hälfte der vorderen Brustwand beim Aufprall gegen die Instrumententafel imprimiert wird. Dies lag bei etwa einem Drittel der Fälle vor, bei denen sämtlich der Tod durch eine Aortaruptur an klassischer Stelle herbeigeführt wurde. Eine Voraussetzung hierfür war, daß die Kniegelenke sich unter der Instrumententafel vorbei bis zur Spritzwand bewegen konnten. War in diesen Fällen die Spritzwand in das Innere des Fahrzeuges eingedrückt, lagen Frakturen der Oberschenkel vor. Während beim Fahrer im allgemeinen der Aufprall gegen die kleine Lenkradnabe die Ursache für den Schaufeleffekt ist, wird beim Beifahrer ein bedeutend breiterer Bezirk des unteren Teils der vorderen Brustwand angegriffen. Dabei treten häufig auch ausgedehnte Leber- und Milzrupturen auf. Milzrupturen sind bei Fahrern frontal zusammenstoßender Fahrzeuge, die als Folge eines Schaufeleffektes an der vorderen Brustwand sterben, äußerst selten.

2.5. Sagittale Impression des Thorax

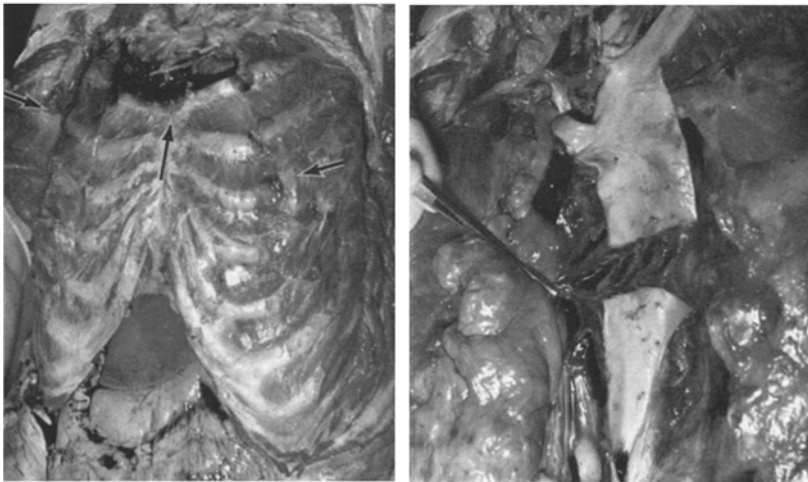
Die sagittale Kompression des Thorax durch Aufprall gegen das Armaturenbrett kann außer zu Rippen- und Sternnumbrüchen zu Verletzungen der V. cava inf. und des Atriumseptums des Herzens, mitunter aber auch zu Rupturen der Aorta ascendens infolge der Dislokation des Herzens nach links unten führen. Nicht selten treten auch Rupturen der Aorta descendens, dabei häufig auch Intimaabschilferungen auf. Es fehlen dagegen Aortarupturen an klassischer Stelle. In derartigen Fällen zeigte die Rekonstruktion der „second collision“, daß der aus seinen Verankerungen am Fahrzeugboden ausgerissene Sitz mit dem gegen das Armaturenbrett geschleuderten Beifahrer gefolgt war, oder aber Spritzwand bzw. Armaturentafel waren tief in das Fahrzeuginnere eingeschoben, so daß der Beifahrer zwischen Sitz und Armaturenbrett eingeklemmt war.

Hierdurch war stets das Untergleiten der Instrumententafel durch die Beckenpartie verhindert worden.

Eine besondere Gefahr für eine lokale Impression liegt in metallischen Profilkanten der Armaturentafeln, die sich infolge Aufpralls des Beifahrers deformieren und noch stärker hervortreten können. Derartige Kanten sind bedeutend gefährlicher als vorspringende Knöpfe.



a



b

Abb. 9a u. b. Frontalkollision. Aufschlag der Brust gegen Armaturenbrett. Impression der vorderen Brustwand mit Zerfetzung des Sternum (Profilkante des Armaturenbrettes). Ruptur der Aorta descendens als Folge einer sagittalen Kompression

2.6. Adduktion des Oberschenkels

Als Folge eines Aufpralles des Kniegelenkes gegen Instrumententafel oder Spritzwand entstehen die Kondylen-, Schaft- und Halsfrakturen des Femur sowie posteriore Acetabulumfrakturen. Sie sind allgemein als „dashboard“-Verletzungen Typ I bekannt. Diese wurden im vorliegenden Material sowohl bei Fahrern als auch beim Beifahrer beobachtet.

Eine andere sehr häufig vorkommende Beckenverletzung wurde von Voigt als dashboard injury Typ II bezeichnet. In diesem Fall wird der Rumpf gegen einen quer über die Beckenvorderwand liegenden Oberschenkel gepreßt. Dies kommt vor, wenn der Beifahrer bei einem frontalen Aufprall mit gekreuzten Oberschenkeln sitzt oder wenn es sich um einen schräg-frontalen Aufprall handelt. Das Trauma resultiert meist in Biegungsfrakturen des Oberschenkelschaftes sowie in

einer Impression der vorderen Beckenwand, mit vertikalen Frakturen durch den vorderen Teil eines oder beider Acetabula oder in dem oberen und unteren Rahmenteil eines oder beider Foramina obturatoria und manchmal Symphysenrupturen. Häufig sind diese Frakturen der vorderen Beckenwand mit ventralen Zerreißen der Gelenkkapseln der Sacroiliacalgelenke kombiniert. Die Toleranz des Beckens gegenüber einem solchen Trauma ist gering.

2.7. Experimentelle Untersuchungen

Instrumententafel und Anschlagstelle für die Kniegelenke sollten nach vorausgegangenem Unfallanalysen so konstruiert werden, daß

- a) der Rumpf des Beifahrers bei einem frontalen Aufprall nicht die aufrechte Haltung verliert,
- b) die Aufschlagstelle für die Vorderfläche des Rumpfes so groß wie möglich ist,
- c) der Kopf keiner rotatorischen Beschleunigung ausgesetzt ist.
- d) Es muß weiterhin vermieden werden, daß die Brust auf vorspringende Kanten aufschlägt.

Um die Richtigkeit dieser Theorie zu überprüfen, wurden unter Verwendung von verschiedenen Instrumententafeln Aufprallversuche mit Leichen durchgeführt (Voigt u. Lange; Wilfert u. Voigt).

Herkömmliches Armaturenbrett. Wie sich aus Abb. 10 ergibt, rutschte der Beifahrer bei dem Stoß, der einem Aufprall aus einer Geschwindigkeit von 50 km/Std entsprach, unter der Armaturentafel hindurch, stieß mit den Kniegelenken gegen die Spritzwand und traf mit dem oberen Teil der Brustvorderwand das Armaturenbrett. Mit dem Kopf scherte er etwas über die Oberkante des Brettes hinweg und fiel auf den Sitz zurück. Bei der Sektion zeigten sich multiple Rippenbrüche, eine Zerreißen der Gelenkkapsel und des rechten Sternoclaviculargelenkes. Außer bilateralen Perikardrupturen resultierte eine querverlaufende Ruptur sämtlicher Wandschichten des rechten Ventrikels des Herzens sowie eine partielle Ruptur des Atriumseptums. — In der Umgebung des Dens axis fanden sich Blutungen, das

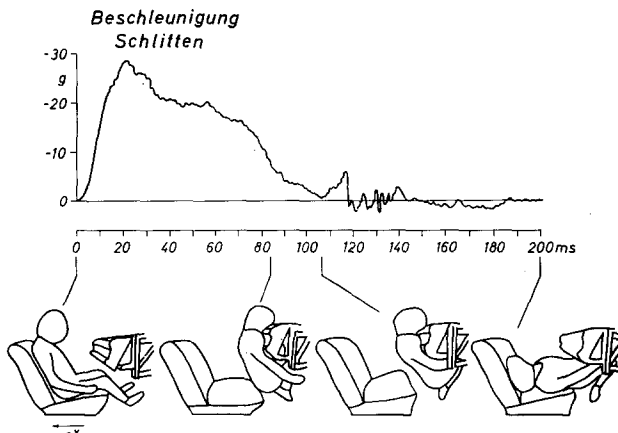


Abb. 10. Aufprallversuch mit herkömmlichem Armaturenbrett

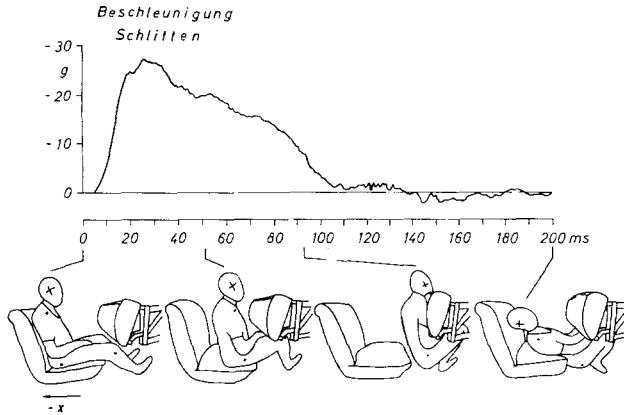


Abb. 11. Aufprallversuch mit vergrößertem Armaturenbrett

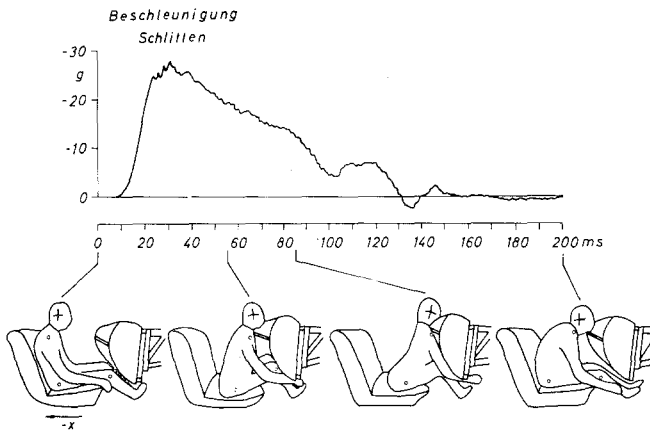


Abb. 12. Aufprallversuch mit extrem großem Armaturenbrett

vordere Längsband war in der Nähe der unteren Kante von C 1 vom Knochen abgelöst. Dorsal hatte es in die Muskulatur in Höhe zwischen C 4 und C 6 geblutet.

Vergrößertes Armaturenbrett, unter dem die Kniegelenke jedoch noch bis zur Spritzwand gleiten konnten (s. Abb. 11). Der Körper behielt seine aufrechte Stellung bei, und eine große Fläche der vorderen Brustwand schlug auf die Armaturentafel auf. Außer einigen Rippenbrüchen resultierte eine Leberzerreißung, wohl als Folge des Aufschlages des unteren Teils der vorderen Brustwand gegen die steile untere Kante des Armaturenbrettes.

Die Zwischenwirbelscheiben zwischen mehreren Halswirbeln zeigten Risse und Blutungen, ohne daß jedoch das vordere Längsband verletzt war.

Extrem großes Armaturenbrett. Diese Armaturentafel wurde gewählt, um die Kniegelenke frühzeitig abzufangen und dem Oberkörper eine möglichst große Aufnahmefläche zu bieten. Ähnliche Armaturenbretter finden sich heute in bestimmten Fahrzeugen. Das Ergebnis dieses Versuches ist alarmierend: Da die Aufschlagstelle für die Kniegelenke etwa in Vertikalebene mit der für die Brust liegt, kommt

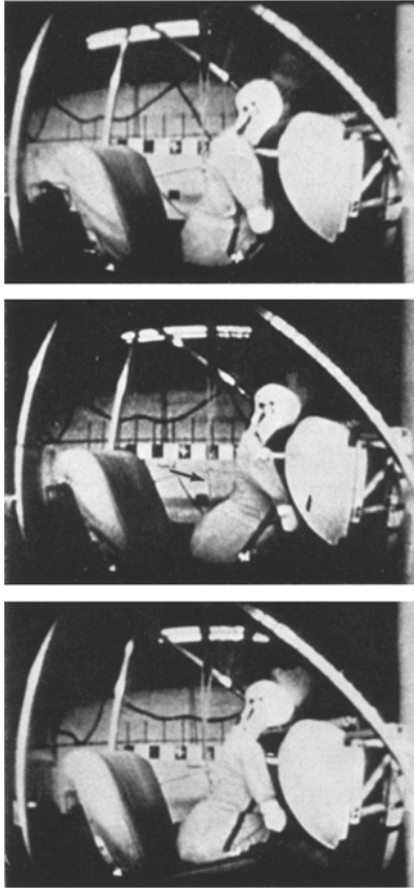


Abb. 13. Ausschnitte aus Highspeed-Film. Rißfrakturen im Bereich der unteren Brustwirbelsäule als Folge der ventralen Ausbiegung

es nach Aufprall der Kniegelenke zu einem Nach-vorn-Kippen des Oberkörpers (Taschenmessermechanismus) und nach Aufschlag von Kinn und oberem Teil der vorderen Brustwand gegen den oberen Teil des Armaturenbrettes zu einer gewaltsamen Ausbiegung der Wirbelsäule nach vorn (s. Abb. 13). Neben einer Axisfraktur kam es zu einer ventralen Rißfraktur im Bereich der unteren Brustwirbelsäule, aber auch zu Rippenfrakturen. Weiterhin resultierten Abrisse von parasagittalen Rückenvenen und umgebende subarachnoidale Blutungen.

„Experimentelle“ *Armaturentafel*. Die Armaturentafel war so vorausberechnet, daß die Kniegelenke des Beifahrers eher als der Oberkörper gegen die nach unten verlängerte Armaturentafel aufschlugen. Hierdurch wurde eine Zwangsverformung des Armaturenbrettes eingeleitet, wodurch eine relativ große Aufschlagfläche für den Oberkörper entstand. Leider bog sich das Armaturenbrett infolge der von dem aufprallenden Versuchskörper bedingten Deformierung nach oben aus, wodurch der obere Teil des Halses abgefangen wurde. Dies führte zu einer Fraktur des Dens axis sowie zum Abriß einer parasagittalen Rückenvene. Am Thorax waren ein-

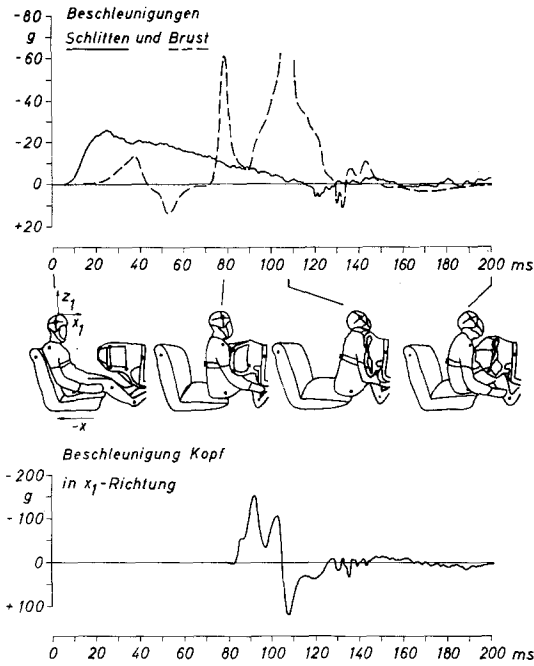


Abb. 14. Experimentelles Armaturenbrett, das zu weit nach oben ausgebogen wurde. Densfraktur

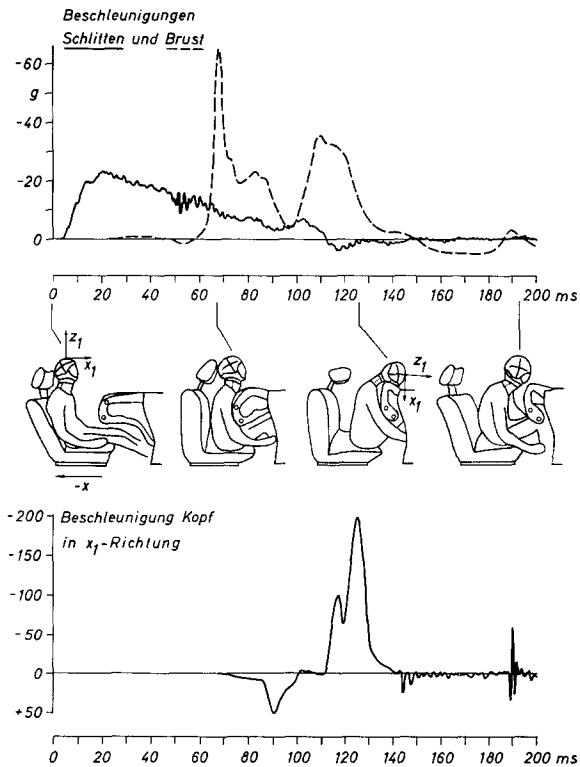


Abb. 15. Aufprallversuch mit experimentellem Armaturenbrett. Keine Verletzungen

zelne Rippenfrakturen (ohne Dislokation der Frakturrenden) und eine Infraktion des Sternum zu beobachten.

Nach einer weiteren konstruktionsmäßigen Verbesserung des Armaturenbrettes wurde schließlich in einem Versuch Kopf, Brust und Oberbauch optimal abgefangen, ohne daß sich in den Filmaufnahmen eine rotatorische Acceleration des Kopfes erkennen ließ. Bei der Sektion ließen sich keine Verletzungen feststellen.

Aus allem läßt sich herleiten, daß es möglich ist, durch gezielte Konstruktionsverbesserungen beim frontalen Auffahrunfall eine größere innere Sicherheit der Fahrzeuge zu erzielen. Bislang ist jedoch die Verwendung von 3-Punktgurten der beste Schutz gegenüber Verletzungen, unter der Voraussetzung, daß die Gurte richtig angelegt sind, die Kabinenwand des Fahrzeuges beim Unfall intakt bleibt und — bezüglich des Fahrers — die Lenkung nicht in das Fahrzeug eindringt.

Literatur

- Coermann, R., Dotzauer, G., Lange, W., Voigt, G. E.: The effects of the design of the steering assembly and the instrument panel on injuries (especially aortic rupture) sustained by car drivers in head-on collisions. *J. Trauma* **12**, 715—724 (1972)
- Dotzauer, G.: Verletzungsfolgen nach Auffahrunfällen — Probleme der inneren Sicherheit aus der Sicht des Mediziners. Taschenbuch: Sicherheit im Straßenverkehr. Stuttgart: Fischer (im Druck)
- Lange, W., Voigt, G. E.: Unveröffentlichte Untersuchung
- Lundevall, J.: Traumatic rupture of the aorta with special reference to road accidents. *Acta path. microbiol. scand.* **62**, 29—33 (1964a)
- Lundevall, J.: The mechanism of traumatic rupture of the aorta. *Acta path. microbiol. scand.* **62**, 34—46 (1964b)
- Voigt, G. E.: Untersuchungen zur Mechanik der Beckenfrakturen und -luxationen. *Hefte Unfallheilk.* **85** (1965)
- Voigt, G. E.: Die Biomechanik stumpfer Brustverletzungen besonders von Thorax, Aorta und Herz. *Hefte Unfallheilk.* **96** (1968)
- Voigt, G. E.: Personbilens inre säkerhet — hur säker är den ? *Läkartidningen* **66**, 993—1007 (1969)
- Voigt, G. E.: Huvud- och halsskador vid frontalkollisioner. *Läkartidningen* **68**, 1866—1880 (1971)
- Voigt, G. E., Lange, W.: Simulation of head-on collisions with unrestrained front seat passengers and different instrument panels. *Proc. of Fifteenth Stapp Car Crash Conference*, pp. 466—488. New York: Society of Automotive Engineers, Inc. 1971
- Voigt, G. E., Löwenhielm, P.: Gliding contusions. *Nord. Rättsmedicinsk Förenings förhandlingar*, Lund, 1973
- Voigt, G. E., Saldeen, T.: Über den Abriß zahlreicher oder sämtlicher Vv. cerebri sup. mit geringem Subduralhämatom und Hirnstammläsion. *Dtsch. Z. ges. gerichtl. Med.* **64**, 9—20 (1968)
- Voigt, G. E., Sköld, G.: Ring fractures at the base of the skull. In press
- Voigt, G. E., Wilfert, K.: Mechanisms of injuries to unrestrained drivers in head-on collisions. *Proc. of Thirteenth Stapp Car Crash Conference*. New York: Society of Automotive Engineers, Inc. 1969
- Wilfert, K., Voigt, G. E.: Mechanisms of injuries to unrestrained front seat passengers and their prevention by progressive instrument panel design. *Proc. of Fifteenth Stapp Car Crash Conference*, pp. 437—465. New York: Society of Automotive Engineers, Inc. 1971

Prof. Dr. G. E. Voigt
Lunds Universitets
Rättsmedicinska Institution
S-22362 Lund
Schweden