

Neue Zeitschrift für Verkehrsrecht

Sonderdruck aus Heft 6/2000

Verlag C. H. Beck München und Frankfurt a. M.

Becke, Manfred E.R., Dipl.-Ing., Münster;
Castro, William H.M., Prof. Dr. med., Münster;
Hein, Martin F., Dr. med., Münster;
Schimmelpfennig, Karl-Heinz, Dipl.-Ing., Münster

„HWS-Schleudertrauma“ 2000 – Standortbestimmung und Vorausblick –

Die gutachterliche Beurteilung von „leichten HWS-Schleudertrauma“ kann häufig nur interdisziplinär erfolgen, da es in der Regel an einem objektiv belegbaren Verletzungsbild fehlt. Der Unfallanalytiker und Biomechaniker kann durch die Ermittlung der biomechanischen Belastung den Mediziner in die Lage versetzen, eine Beurteilung vorzunehmen, ob überhaupt eine Beanspruchung vorlag, die eine HWS-Verletzung auslösen konnte. In diesem Beitrag werden für verschiedene orthopädisch-traumatologischen Beurteilung heranzuziehen Untersuchungsreihen mit Freiwilligen beschrieben. Da zu dieser Thematik zu viele unbewiesene Meinungen und Dogmen verbreitet werden, wie auch der Präsident Hugh Anton beim Weltkongress zum Thema „whiplash-associated disorders“ (WAD) im Februar 1999 in Vancouver Canada vortrug, soll dieser Aufsatz zu einer Aufklärung beitragen.

I. Einleitung

Das sog. „Halswirbelsäulen-Schleudertrauma“ („HWS-Schleudertrauma“) wird uns weit über das Jahr 2000 beschäftigen.

Als Sachverständige für Unfallanalyse bzw. orthopädisch-traumatologische Fragen zu diesem Thema bekommen wir täglich neue HWS-Fälle zur Beurteilung vorgelegt. Meistens geht es hierbei um die Folgen eines Verkehrsunfalls. Häufig handelte es sich in der Vergangenheit um passiv erlittene Heckkollisionen. Mittlerweile hat eine Entwicklung dahingehend stattgefunden, dass in vielen Fällen andersartige Beanspruchungen vorliegen. Hierzu zählen Belastungen durch Seitenkollisionen, Streifkollisionen oder gar Beanspruchungen durch Fahrvorgänge wie Ausweichvorgänge, Bremsvorgänge oder Überfahren eines Bordsteins.

Ludolph (1998) schreibt, dass die Sicherung von Unfallfolgen stets Unfallrekonstruktion sei. Hier unterscheidet er drei Schritte:

- Rekonstruktion der unfallbedingten Bewegung der Fahrzeuge (Unfallmechanik)
- Rekonstruktion der unfallbedingten Bewegung der Fahrzeuginsassen (Biomechanik)

- Rekonstruktion der unfallbedingten biomechanischen Gefährdung/Belastung (Pathomechanik)

Eine derartig detaillierte Begutachtung kann nur durch mehrere Spezialisten erfolgen. Für die Rekonstruktion der Fahrzeugbewegungen ist Ingenieurwissen erforderlich. Diese Aufgabe kann der Unfallanalytiker übernehmen. Auf dem Gebiet der Biomechanik arbeiten Unfallanalytiker, Orthopäden, Rechtsmediziner, Biomechaniker und Traumatologen. Das Gebiet der Pathomechanik wird durch Mediziner abgedeckt. Häufig arbeiten Rechtsmediziner auf diesem Gebiet. Allerdings haben sie es in der Regel mit schweren und schwersten Verletzungsbildern zu tun. Bei der Beurteilung von mittelschweren und leichten HWS-Verletzungen können Rechtsmediziner jedoch nicht auf klinische Erfahrungen zurückgreifen; hier ist der Orthopäde bzw. Traumatologe gefragt.

Für den Sachverständigen liegt folgendes Dilemma vor: Es gibt nach wie vor keinen auf wissenschaftlicher Basis erarbeiteten, allgemein anerkannten Kenntnisstand und Beurteilungsstandard über das Thema „HWS-Schleudertrauma“ nach geringen Belastungen. Dieser Beitrag soll eine Übersicht über den Stand der Diskussionen und über die gegenwärtigen Möglichkeiten eines in technischen und orthopädisch-traumatologischen Fragen tätigen Sachverständigen geben.

II. Das Beurteilungsproblem

In der Vergangenheit haben Gerichte, Anwälte und Versicherungen ein ärztliches Attest des behandelnden Hausarztes mit der Diagnose „HWS-Schleudertrauma“ häufig als Beweis für einen tatsächlichen Körperschaden akzeptiert.

Der behandelnde Arzt beachtete jedoch häufig nicht, dass er in dem Moment, in dem er eine Körperverletzung attestiert und die Aufgabe eines Gutachters in einem Haftpflicht-Fall ausüben soll, er die Verletzung mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit feststellen muss. Ein bloßer Verdacht oder eine Überzeugung, die der Arzt aus den Schmerzäußerungen und Beschreibungen des Patienten gewinnt, reicht nicht aus;

auch dann nicht, wenn die Beschwerden sich plausibel in eine vom Patienten abgegebene Unfallschilderung einfügen; nach Lemcke (1998) ist in einem Zivilprozess, in dem der Kläger die Verletzung beweisen muss, eine mit an Sicherheit grenzende Wahrscheinlichkeit erforderlich (der sogenannte Vollbeweis). Eine erhebliche Wahrscheinlichkeit reicht nicht aus.

Die sich mittlerweile anschließenden Dauerschäden mit hohen Folgekosten haben dazu geführt, dass entsprechende Atteste durch die Versicherungen hinterfragt werden, um festzustellen, ob der Arzt seine Feststellung auf einen objektivierbaren Befund gegründet hat oder das Gutachten lediglich auf den Angaben des Patienten beruht.

Bei dem sog. leichten „HWS-Schleudertrauma“ fehlt es in der Regel an einem objektiv belegbaren Verletzungsbild. Da die Rechtsprechung den Vollbeweis der unfallbedingten Primärschädigung verlangt, ist dieses allein mit einem subjektiven Beschwerdebild, wie Schmerzen im Nacken, Übelkeit, Kopfschmerzen etc. nicht zu führen. Die Tatsache, dass die zu beurteilende Person einen Unfall erlitten hat, ohne dass dieser näher definiert wäre, reicht mit Sicherheit ebenfalls nicht aus, da einerseits sehr viele Personen Unfälle unverletzt überstehen und andererseits viele Personen genau die Beschwerden, die der zu Begutachtende angibt, auch ohne Unfall beklagen. Je weniger Basisinformationen dem medizinischen Sachverständigen zur Verfügung stehen, um so vager wird die Beurteilung ausfallen müssen. Dann bleibt dem medizinischen Sachverständigen nur die Möglichkeit, zusätzlich über die nach heutigem Kenntnisstand vorhandene Möglichkeit eines Verletzungseintritts zusätzliche Ausführungen zu machen. Schröter (1998) schreibt, diese entspräche nicht dem Wesen medizinischer Begutachtung, sondern sei nur noch der letzte Strohalm, nach dem gegriffen werde, wenn keine verwertbaren Informationen zur Verfügung stünden. Wie wichtig dieser letzte Strohalm für die medizinische Begutachtung sein kann, wird im nachfolgenden aufgezeigt.

III. Die technisch-biomechanische Unfallanalyse

Um die Möglichkeit eines Verletzungseintritts abzuklären, ist eine Unfallanalyse durch einen Unfallsanalytiker und Biomechaniker erforderlich. Dieser erhält nun den Auftrag, bestimmte noch näher zu beschreibende Größen zu ermitteln, und diese dem medizinischen Sachverständigen zur Verfügung zu stellen. Anhand der aus der technischen Analyse gewonnenen Werte kann der Mediziner unter Berücksichtigung personenspezifischer Daten (d. h. evtl. vorliegende verletzungsfördernde Faktoren) nun beurteilen, ob überhaupt die Möglichkeit einer HWS-Verletzung bestand.

Sondiert man die vorhandene Literatur zum Thema „HWS-Schleudertrauma“, so wird die herausragende Bedeutung der Heckkollision sofort deutlich. Fast sämtliche Publikationen behandeln automatisch den Heckauffahrunfall, sobald der Begriff „HWS-Schleudertrauma“ genannt wird. Tatsache ist allerdings, dass sich die Gerichte und auch die Gutachter in großem Maße auch zusehends mit anderen Konstellationen beschäftigen müssen, deren Beurteilung nicht einfacher, sondern komplizierter wird.

Die Heck- und Frontalkollision

Relativ einfach lassen sich noch die Fälle behandeln, in denen sich die eingehaltene Geschwindigkeit eines Fahrzeuges lediglich der Größe nach verändert, die Richtung jedoch beibehalten wird. Die Heckkollision ist ein klassischer Repräsentant dieser Sparte. Man betrachte folgendes Beispiel: bewegt sich ein Pkw mit der Geschwindigkeit 20 km/h vorwärts und prallt ein nachfolgendes Fahrzeug mit einer Geschwindigkeit von 50 km/h auf, so verändern sich die Fahrgeschwindigkeiten beider Fahrzeuge; das vordere Fahrzeug wird beschleunigt und das auffahrende verlangsamt. Die Richtungen der Geschwindigkeiten bleiben jedoch erhalten. Bei einer Frontal- und einer

Heckkollision handelt es sich typischerweise um eine eindimensionale Kollision.

Allein die Angabe des Betrages der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung oder aber der Beschleunigung bzw. Verzögerung in Längsrichtung des Fahrzeugs reicht schon aus, um die Kollision zu beschreiben.

Prinzipiell gibt es mehrere Möglichkeiten, die auf die Fahrzeuge einwirkenden Beanspruchungen während einer Kollision zu beschreiben. Die genaueste Methode liegt darin, die auf die Fahrgastzelle einwirkende Beschleunigung über die Zeit als Diagramm anzugeben. Man hat dann den exakten Beschleunigungsanstieg, die Kollisionsdauer, die Höhe eines möglichen Beschleunigungsplateaus und auch den Abfall der Beschleunigung explizit beschrieben. Diese Darstellung ist für den technischen Laien jedoch häufig sehr abstrakt und daher schwierig nachzuvollziehen. Wie nachfolgend noch gezeigt werden wird, ist es für Standardsituationen auch nicht erforderlich, diese Darstellung zu wählen. Es reicht für Frontal- und Heckkollisionen im allgemeinen aus, wie auch in der internationalen Literatur dargestellt, die Kollision durch die Angabe einer kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung Δv für das betrachtete Fahrzeug zu beschreiben (Castro et al., 1997; Meyer et al., 1999; Hell et al., 1999). Die Geschwindigkeitsänderung ist dabei die Geschwindigkeitsdifferenz der Geschwindigkeiten eines Fahrzeugs unmittelbar vor und unmittelbar nach dem Anstoß. Man darf sie nicht mit der Relativgeschwindigkeit zweier Fahrzeuge vor dem Kollisionsereignis verwechseln.

In der klassischen Unfallanalyse tauchen immer wieder die gleichen Fragen auf. In der Regel wird nach den Kollisionsgeschwindigkeiten gefragt. Diese sind für die Beanspruchung nicht entscheidend, sondern lediglich die Relativgeschwindigkeit zwischen den Fahrzeugen. Die Beanspruchung drückt sich in der Summe der Beschädigungen an beiden Fahrzeugen aus.

Für Zweifler sei folgendes Beispiel beschrieben: Wir stellen uns vor, ein Pkw steht und ein zweiter Pkw prallt mit einer Geschwindigkeit von 30 km/h von hinten auf. Es entsteht ein bestimmter Beschädigungsumfang. Wir stellen eine bestimmte kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung bei beiden Fahrzeugen fest. Jetzt verladen wir beide Fahrzeuge auf einen Zug der Bahn. Der Zug bewegt sich mit einer Geschwindigkeit von 120 km/h. Das zweite Fahrzeug fährt relativ zum Zug auf dem Waggon mit einer Geschwindigkeit von 30 km/h vorwärts und prallt auf den vor ihm auf dem Zug stehenden Pkw. Wir haben jetzt exakt die gleiche Situation. Die Relativgeschwindigkeit beträgt 30 km/h und es entstehen gleichartige Beschädigungen. Fragt man nach den tatsächlichen Fahrgeschwindigkeiten der Fahrzeuge, so betrug die Geschwindigkeit des vorderen Fahrzeugs 120 km/h (Zuggeschwindigkeit) und die des auffahrenden Fahrzeugs 30 km/h + 120 km/h = 150 km/h. Hätte man die Geschwindigkeit der Fahrzeuge zum Zeitpunkt der Kollision mit einer ortsfesten Lichtschranke gemessen, hätte man die Pkw-Geschwindigkeiten von 120 km/h und 150 km/h abgelesen. Auch Zweifler werden sich anhand dieses Beispiels deutlich machen können, dass der Beschädigungsumfang und damit die Beanspruchungshöhe beim Auffahrunfall tatsächlich nur von der Relativgeschwindigkeit bestimmt wird, unabhängig von dem tatsächlichen Geschwindigkeitsniveau beider Fahrzeuge.

Die Relativgeschwindigkeit der Fahrzeuge ergibt sich aus folgender Gleichung:

$$v_1 - v_2 = \frac{1}{\sqrt{1 - k^2}} \cdot \sqrt{\frac{m_1 \cdot EES_1^2 + m_2 \cdot EES_2^2}{m_1 + m_2}}$$

Man erkennt in dieser Gleichung die Fahrzeugmassen m_1 und m_2 , EES-Werte und den k -Faktor (siehe auch S. 5). Index 1: stoßendes Fahrzeug, Index 2: gestoßenes Fahrzeug.

Mit Hilfe des Impulssatzes lässt sich jetzt die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung des gestoßenden Fahrzeuges Δv_1 nach folgender Gleichung ermitteln:

$$\Delta v_2' = \frac{1+k}{2} \cdot \frac{2 \cdot m_1}{m_1 + m_2} (v_1 - v_2)$$

Für die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung des stoßenden Fahrzeuges würde eine andere Gleichung gelten. Insofern muss in den Gleichungen zwischen Δv_1 und Δv_2 unterschieden werden. Im Text ist in der Regel beschrieben, welches Fahrzeug gemeint ist, so dass dort auf die Indizes verzichtet werden kann.

Um die Belastungshöhe zu beschreiben, ist die Geschwindigkeitsänderung des gestoßenen Fahrzeugs zu bestimmen. Dies geschieht mit den oben aufgeführten Gleichungen rechnerisch mit Hilfe der aufgenommenen Formänderungsenergie, die durch die Fahrzeugverformungen beschrieben wird. Sie weist die Dimension Nm auf.

Die aufgenommene Formänderungsenergie kann auch durch einen EES-Wert (Energy Equivalent Speed) ausgedrückt werden.

$$E_{\text{Formänderung}} = \frac{1}{2} m \text{ EES}^2$$

Der EES-Wert ist somit ein Maß für die Deformationsenergie. Es handelt sich um die Geschwindigkeit, mit der man gegen ein feststehendes und nicht deformierbares Hindernis fahren muss, um die gleichen Fahrzeugverformungen zu erzeugen; vorausgesetzt, das Fahrzeug kommt an diesem Hindernis auch zum Stillstand. Aufgrund von Teileelastizitäten prallt es geringfügig zurück. Der EES-Wert ist dann geringfügig kleiner als die Kollisionsgeschwindigkeit, da ein Teil der zuvor vorhandenen kinetischen Energie nicht in Verformung umgewandelt wird, sondern als kinetische Energie für den Rückprall eingesetzt wird.

Kennt man Versuche, bei denen exakt vergleichbare Fahrzeuge gecrasht wurden und sind die aufgetretenen Verformungen identisch, so lässt sich die aufgenommene Verformungsenergie mit Angabe des EES-Wertes und der dazugehörigen Fahrzeug-Testmasse bestimmen.

Für den Unfallanalytiker ist die Angabe eines einigermaßen zuverlässigen EES-Wertes problematisch. Die Industrieversuche zeigen häufig Crash-Tests mit für diese Problematik völlig unzureichender Konstellation. Häufig handelt es sich um Crash-Tests mit viel zu hohen EES-Werten. Für die hier vorliegende Betrachtung benötigt man in der Praxis EES-Werte zwischen 4 und 15 km/h, wobei EES-Werte von 6 bis 8 km/h sehr häufig gebraucht werden.

Bei modernen Fahrzeugstrukturen, bei denen der Stoßfänger (früher Stoßstange genannt) häufig aus einer rundlichen Kunststoffschale besteht, die eine mehr oder weniger komplizierte Unterkonstruktion verbirgt, lässt sich aufgrund der elastischen Rückverformung dieser Kunststoffschale auf den ersten Blick in diesem EES-Bereich häufig kaum ein Schaden ausmachen. Dieser wird erst deutlich, wenn die Kunststoffschale abgenommen wird und die Verformungen an der dahinter liegenden Konstruktion betrachtet werden oder sogar erst, wenn der Kofferraum geöffnet wird und im Fahrzeuginneren nach Verformungen gesucht wird.

Der Unfallanalytiker benötigt eine Vielzahl von Versuchsergebnissen zu Vergleichszwecken. Ggf. müssen neue Versuche durchgeführt werden, um verwendbare Ergebnisse zu erhalten. In Ermangelung von vergleichbaren Testergebnissen werden EES-Werte von technischen Sachverständigen häufig geschätzt und mit dem Hinweis auf Versuche, die oft nicht beigefügt werden, begründet. Das Abschätzen von EES-Werten ist durch erfahrende Sachverständige, die über einen großen Fundus an Vergleichsmaterial verfügen, durchaus möglich. Für Ungeübte

oder Laien allerdings ist hier eine sehr große Gefahr gegeben, da allein aus der Verformungstiefe nicht auf den EES-Wert rückgeschlossen werden kann. Vielmehr benötigt man Detailkenntnisse darüber, welche Fahrzeugstrukturen weich und welche hart sind. Bei einem Audi 80-Heck beispielsweise handelt es sich um ein äußerst weiches Heck. Schon bei geringen EES-Werten sind hier massive Deformationen festzustellen. Auf der anderen Seite weist ein Opel Kadett E Kombi ein äußerst hartes Heck auf. Auf den ersten Blick sind bei diesem Fahrzeug noch bei relativ hohen EES-Werten nahezu keinerlei Deformationen ersichtlich. Welche Vorgehensweise ist zu wählen, wenn an einem Fahrzeug kein sichtbarer Schaden entstanden ist? Dieses kann bedeuten, dass entweder ein EES-Wert 0 km/h oder aber ein EES-Wert zu berücksichtigen ist, der gerade die Grenze zwischen beginnender, erkennbarer Verformung und unverformtem Zustand tangiert. Häufig liegt der Grenz-EES-Wert in der Größenordnung von 3 bis 4 km/h, wobei die spezielle Konstruktion des Fahrzeugs zu berücksichtigen ist.

In den Gleichungen zur Bestimmung der Relativgeschwindigkeit und der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung ist noch der sog. k-Faktor (auch Stoßziffer oder Stoßzahl genannt) enthalten. Es handelt sich dabei um einen Wert, der den Elastizitätsgrad einer Kollision beschreibt. Die Stoßziffer k ist definiert als Verhältnis der Relativgeschwindigkeiten der Fahrzeuge nach und vor dem Zusammenstoß:

$$k = \frac{v_2' - v_1'}{v_1 - v_2}$$

k = 1 beschreibt einen voll elastischen Stoß (Beispiel: werden zwei Stahlkugeln an dünnen Fäden aufgehängt und lenkt man eine aus, so gibt bei gleichen Massen dieser Kugeln die erste Kugel den Impuls voll an die zweite ab. Die erste Kugel wird bei der Kollision bis zum Stillstand abgebremst, während sich die zunächst in Ruhe befindliche Kugel mit der ursprünglichen Geschwindigkeit der ersten weiterbewegt).

Mit k = 0 ist der plastische Stoß beschrieben (Beispiel: prallt anstelle von Stahlkugeln eine Knetgummikugel gegen eine zweite, werden sich beide gemeinsam mit der gleichen Geschwindigkeit weiterbewegen. Es kommt nicht zu einer Trennung der Kugeln.)

Bei Fahrzeug-Fahrzeug-Kollisionen handelt es sich um eine Mischform zwischen einer vollelastischen und vollplastischen Kollision. Bei Front-Heck-Kollision liegt der k-Faktor in der Regel zwischen knapp über 0 bis etwa 0,3. Dieses bedeutet, die Fahrzeug-Fahrzeug-Kollisionen laufen im wesentlichen plastisch ab, mit einer geringeren Teileelastizität. Anders ausgedrückt, bei gleichen Massen bewegen sich zwei Pkw nach der Kollision ungefähr mit der gleichen Geschwindigkeit weiter.

Durch die Teileelastizität der Kollision bewegt sich das angestoßene Fahrzeug geringfügig schneller, so dass es zur Trennung der Fahrzeuge kommt. Daher wird der Grad der Teileelastizität teilweise auch durch die Trennungsgeschwindigkeit beschrieben. Sie liegt für normale Auffahrkollisionen in der Größenordnung von 1 bis 3 km/h.

Um den k-Faktor für den gegebenen Fall in engen Grenzen einsetzen zu können, muss wiederum eine große Versuchserfahrung vorliegen. Der k-Faktor hängt u. a. von dem Relativgeschwindigkeitsniveau, von der Fahrzeugüberdeckung in Querrichtung und von speziellen Fahrzeugeigenschaften ab.

Da eine Vielzahl von Parametern einfließt, wird man immer eine gewisse Bandbreite für den k-Faktor zulassen. Für Kollisionen mit einer Fahrzeugbreitenüberdeckung bis zu 50% lässt sich ein k-Faktor von etwa 0,00 bis 0,15 angeben. Für einen Überdeckungsgrad von etwa 50% liegen die Stoßzahlen bei etwa 0,10 bis 0,20. Oberhalb von 50% Überdeckung sind k-Faktoren von etwa 0,15 bis 0,30 anzusetzen. Diese Werte wurden auf der Craschanlage des Ingenieurbüros Schimmelpfennig + Becke anhand

von 38 Auffahr-Crashtests mit Relativgeschwindigkeiten zwischen 7,8 und 32,4 km/h festgestellt (Kalthoff, 2000). Diese Angaben beschreiben die gesamte Bandbreite der durchgeführten Pkw-Versuche und beinhalten somit erheblich voneinander abweichende Fahrzeugkonstruktionen.

Prallt ein Lkw oder Lastzug mit geringer Geschwindigkeit auf einen stehenden Pkw auf, so kann aufgrund des k -Faktors und der Massenverhältnisse von bis zu 50 : 1 die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung Δv des Pkw größer sein, als die Kollisionsgeschwindigkeit des Lkw, (Meyer, 1996).

Man sollte somit als Kriterium für die Verletzungsmöglichkeit nie auf die Relativgeschwindigkeit der Fahrzeuge, sondern nur auf die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung Δv zurückgreifen. Dabei ist zudem noch zu beachten, dass bei Lkw-Pkw-Kollisionen die Kollisionsdauer im Mittel bei etwa 0,09 s liegt und damit geringfügig unter der für Pkw-Pkw-Kollisionen mit ca. 0,11 bis 0,12 s.

Häufig wird dem Unfallanalytiker unzulängliches Material zur Bearbeitung zur Verfügung gestellt. Oft liegen nur von einem der Fahrzeuge Unterlagen vor, nämlich von dem des Geschädigten. Der Schädiger repariert sein Fahrzeug in diesem Belastungsbereich häufig mehr oder weniger provisorisch in Eigenleistung. Der Angabe, das Fahrzeug des Schädigers sei unbeschädigt geblieben, sollte mit einem gesunden Misstrauen begegnet werden. Bei Nachbesichtigungen hat sich schon hin und wieder gezeigt, dass die Fahrzeuge keineswegs unbeschädigt waren.

Falls nur Lichtbilder und Schadensbeschreibungen von einem der beteiligten Fahrzeuge vorliegen, muss die Energieaufnahme des nicht dokumentierten Fahrzeugs bestimmt werden. Im Extremfall ist es erforderlich, einen oder mehrere Versuche mit direkt baugleichen Fahrzeugen durchzuführen, mit dem Ziel, das Beschädigungsbild des durch Fotos dokumentierten Fahrzeuges nachzubilden. Gelingt dieses, ergibt sich das Schadensbild am zweiten Fahrzeug automatisch. Da ohnehin ein Versuch erforderlich wurde, sind auch bei entsprechender Messeinrichtung sofort die gewünschten Daten, mit denen die Beanspruchung des gestoßenen Fahrzeugs beschrieben werden kann, bekannt. Mit großer Versuchserfahrung und mit Kenntnis der Verformungseigenschaften der beteiligten Fahrzeuge lässt sich auch durch Anlehnung an andere Versuche teilweise ein befriedigendes Ergebnis mit ausreichender Genauigkeit erzielen.

Hilfsweise kann die vom zweiten Fahrzeug aufgenommene Verformungsenergie über eine Abschätzung der Verformungstiefe unter Berücksichtigung des Newton'schen Grundgesetzes: „actio = reactio“ erfolgen. Dieses sagt aus, dass die maximal auftretende Verformungskraft auf beide Fahrzeuge in gleicher Höhe (mit entgegengesetzter Richtung) einwirkt.

Gewarnt werden muss vor einer Faustformel, die seit den 70-er Jahren kursiert, der EES-Wert könne wie folgt bestimmt werden: pro 1 cm Verformung nehme man 1 km/h als EES-Wert, siehe auch (Schmidt, 1989). Für volle Fahrzeugüberdeckungen und gleichzeitig hohe Relativgeschwindigkeiten mag dieses näherungsweise noch zutreffen. Für die hier sehr feinfühligsten Untersuchungen im untersten Geschwindigkeitsbereich ist eine derartige Faustformel schlicht unbrauchbar.

Die Kollisionsdauern liegen für eindimensionale Front-Heck-Kollisionen bei größerer Fahrzeugüberdeckung in sehr engen Grenzen fest. Im Mittel liegen sie in der Größenordnung von 0,11 bis 0,12 s. Nur bei sehr geringen Fahrzeugüberdeckungen mit sehr großen Eindringtiefen konnten wir bei Auffahrkollisionen Kollisionsdauern von bis zu 0,17 s beobachten. Im untersten Kollisionsgeschwindigkeitsbereich, in dem nahezu keinerlei Beschädigung auftritt, kann die Kollisionsdauer auch noch knapp unter 0,1 s sinken.

Handelt es sich um eine Standardkonstellation, bei der man aufgrund der Versuche weiß, dass die Kollisionsdauer im nor-

malen Bereich liegt, reicht die Angabe der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung aus, um eine Aussage zur Belastung des Fahrzeugs und damit des Insassen zu treffen, da die mittlere Zellenbeschleunigung als Quotient aus Δv und Δt ermittelt wird.

Schließlich wird in der Literatur (z. B. Kuhn 1998) darauf hingewiesen, dass es noch darauf ankäme, wie die Zellenbeschleunigung ansteige. Auch hierdurch würde die Beanspruchung der Insassen beeinflusst.

Grundsätzlich ist dieses richtig. Die Ursache für einen derartigen Hinweis liegt darin, dass häufig Versuche herangezogen werden, die nicht als Fahrzeug-Fahrzeug-Kollisionen durchgeführt wurden, sondern in Form von Schlittentests. Der hier aufgebrauchte Verzögerungsverlauf muss nicht zwangsläufig mit dem einer Fahrzeug-Fahrzeug-Kollision auch nur entfernt Ähnlichkeit besitzen.

Betrachtet man beispielsweise die Fahrzeugschlitten, die von der Verkehrswacht eingesetzt werden, um für die Frontbelastung die Wirksamkeit der Sicherheitsgurte darzustellen, so zeigten eigene Messwerte, dass die Abbremsung dieser Schlitten eine normale Fahrzeug-Fahrzeug-Kollision in diesem Relativgeschwindigkeitsbereich in keiner Weise annähernd richtig beschreibt. Die Kollisionsdauer beträgt hier nur 0,01 s, also nur ungefähr 1/10 derjenigen, die bei einer normalen Kollision auftritt. Entsprechend hart wirkt sich diese Kollision auf den Insassen aus, da die mittlere Verzögerung als Quotient

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

gebildet wird.

Keht man zurück zu den kritischen Stimmen, dass man den Anstieg der Beschleunigung zu berücksichtigen habe, so ist darauf zu verweisen, dass die auftretenden Beschleunigungsanstiege im Fahrzeug-Fahrzeug-Versuch mit ausreichender Näherung den tatsächlichen Beschleunigungsanstiegen bei vergleichbaren Fahrzeug-Fahrzeug-Unfällen entsprechen. Derartige Unterschiede, wie eben mit dem Schlittentest beschrieben, liegen hier nicht vor.

Löhle (1997, 1998) weist darauf hin, dass noch die Reibungskräfte der Reifen des angestoßenen Fahrzeugs bei der Ermittlung von Δv zu berücksichtigen seien. Er beschreibt einen Vergrößerungsfaktor 1,3, der durch die Reibungskräfte der Reifen hervorgerufen werde. Dieser Faktor wirke sich wie eine Vergrößerung der Masse des angestoßenen Fahrzeugs aus. Bei einem Fahrzeug, das zum Kollisionszeitpunkt voll abgebremst wird, läge dieser Vergrößerungsfaktor eher über 1,3.

Eine Untersuchung von 38 Heckauffahr-Crashtests, die im Ingenieurbüro Schimmelpfennig und Becke in der Vergangenheit durchgeführt wurden, und bei denen das gestoßene Fahrzeug teilweise durch eine angezogene Handbremse und einen eingelegten 1. Gang „gebremst“ war, führte auf einen Vergrößerungsfaktor von maximal 1,1.

Je größer die Masse des angestoßenen Fahrzeugs, desto kleiner wird die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung ausfallen. D. h., je größer dieser Verzögerungsfaktor ist, desto kleiner wird Δv .

Würde man einen Wert von 1,3 einsetzen, ergäbe sich zu Ungunsten des Betroffenen ein zu geringer Δv -Wert seines angestoßenen Fahrzeugs. Weil ohnehin in der Regel über den Bremszustand nichts bekannt ist, sollte man auf die Benutzung des Vergrößerungsfaktors eher verzichten, um nicht Werte zu Ungunsten des Betroffenen zu produzieren.

Bei der Auffahrkollision gibt es immer ein auffahrendes Fahrzeug und ein von hinten gestoßenes Fahrzeug. In der Regel geht es um Kollisionen, bei denen die betroffenen Insassen in einem passiv von hinten angestoßenen Fahrzeug sitzen oder aber um Insassen in einem frontal beanspruchten Fahrzeug, das ebenfalls passiv angestoßen wurde, und zwar

durch ein rückwärts setzendes Fahrzeug. Im zweiten Fall liegt die Beanspruchung einer Frontalkollision vor.

Für den Techniker ist es, bezogen auf die zu ermittelnden kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderungen, zunächst gleichgültig, von welchem dieser beiden Fahrzeuge dieser Wert erfragt wird, so dass keine von der Heckkollision abweichende Bearbeitung erfolgt.

Zur Darstellung der Insassenbewegung und der biomechanischen Belastung sollten bei allen Kollisionsarten zudem folgende Daten bekannt sein, auch wenn möglicherweise aufgrund mangelnder Forschungsergebnisse aus einzelnen Daten keine gesicherten Folgerungen möglich sind.

- Position im Fahrzeug (Fahrer, Beifahrer etc.)
- Sicherheitsgurt (ja/nein), Airbags (ja/nein)
- Personendaten (Größe, Gewicht, Alter, Geschlecht)
- Beschreibung der Sitzhaltung (normal, vorgebeugt, zur Seite gedreht etc.)
- Gestaltung des Sitzes (Seriensitz, nicht serienmäßiger Sport- oder Schalensitz, Lehnenneigung und Stellung der Kopfstütze)

Bleibt man zunächst bei der Heckkollision, so wirkt die Geschwindigkeitsänderung von hinten nach vorn auf das Fahrzeug ein. Dieses bedeutet, das Fahrzeug und damit auch der Sitz werden unter dem Insassen nach vom gestoßen. Der Insasse bewegt sich relativ im Fahrzeug nach hinten. Die dabei anhand von Versuchen ermittelten auftretenden Insassenbewegungen sind näher zu beschreiben. An dieser Stelle ist auch zu berücksichtigen, ob die Geschwindigkeitsänderung exakt in Längsrichtung des Fahrzeugs oder möglicherweise schräg von hinten stattfand, wodurch sich zusätzliche Anstoßmöglichkeiten an der Kante der Kopfstütze oder dergleichen ergeben.

Abweichungen von der Norm ergeben sich insbesondere durch besondere Sitzkonstruktionen (Fiat Panda) oder bei extremer Körpergröße.

Derartige Gegebenheiten können entweder tendenziell beschrieben werden, mit den zur Zeit vorhandenen Kenntnissen belegt oder aber, falls es sich nach bisherigen Erkenntnissen um unkritische Situationen handelt, durch Freiwilligen-Versuche nachgebildet werden, um sie besser beschreiben zu können.

Zu beachten ist aber bei reinen Auffahrkollisionen, dass sich auch Einflüsse überlagern können. Dabei können folgende Situationen entstehen:

Das Fahrzeug A fährt auf ein davor befindliches Fahrzeug B auf. Der Insasse im Fahrzeug A wird im Gurt nach vorn verlagert und nimmt eine von der normalen Sitzposition stark abweichende Position ein. In dieser Position kann es zum Auffahren eines nachfolgenden Fahrzeug C auf das Heck des Fahrzeug A kommen. Die Ausgangssituation ist sowohl von der Sitzposition, als auch von der momentanen Belastung auf den Insassen von einer ungestörten Situation verschieden.

Nach einer Frontalkollision kommt es für den Fahrzeugführer A zu einer Rückschwingbewegung des Oberkörpers aus dem Gurt. In dieser Situation kann ebenfalls das nachfolgende Fahrzeug C aufprallen. Es überlagert sich die schon vorhandene Relativbewegung des Insassen relativ nach hinten mit der zusätzlichen Belastung von hinten.

Deutlich häufiger kommt aber eine Situation vor, bei der das Fahrzeug A zunächst von hinten durch das Fahrzeug C angestoßen wird, es dadurch zu der relativen Rückverlagerung des Insassen gegenüber der Rückenlehne und der Kopfstütze kommt. Anschließend kommt es zur energieärmeren Vorwärts-Relativbewegung im Fahrzeug, der sog. Rebound-Bewegung.

Während dieser Rebound-Bewegung kann es jetzt zur Frontalkollision auf das vor dem Fahrzeug A befindliche Fahrzeug B kommen. In dieser Situation ist eine Überlagerung der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung aus der Frontalkollision mit der ohnehin schon vorhandenen Relativbewegung im Fahrzeug durch die Rebound-Bewegung zu berücksichtigen.

Dabei ist nach hier durchgeführten Filmauswertung von Insassenbewegungen aus der Studie von Castro et al. (1997) von einer Relativbewegung des Halses gegenüber dem Fahrzeuginnenraum mit einer Geschwindigkeit von etwa 50 bis 70% der bei der Heckkollision erreichten kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung auszugehen.

Folgendes Beispiel soll dieses verdeutlichen: Wird bei der Frontalkollision eine kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung von 15 km/h erreicht und bei der zuvor erlittenen Heckkollision eine kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung von beispielsweise 10 km/h, so schwingt der Hals des Insassen mit etwa 5 bis 7 km/h relativ zum Fahrzeug während der Rebound-Bewegung vorwärts, überlagert durch eine kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung durch die Frontalkollision von 15 km/h. Somit ist vom Hals gegenüber dem Fahrzeug eine Geschwindigkeitsänderung von $15 + 5 = 20$ km/h bis $15 + 7 = 22$ km/h abzubauen.

Die Seitenkollision

Wie eingangs schon erwähnt, werden „HWS-Schleudertraumata“ keineswegs nur bei Heckkollisionen beschrieben. Eine besondere Herausforderung für den technischen Sachverständigen ist die technische Aufbereitung einer Seitenkollision, die sich häufig als Streifkollision darstellt. Für einfache Kollisionen, z. B. bei Heckaufprall oder einen Seitenaufprall im stumpfen Winkel auf ein stehendes Fahrzeug, kann zur Beurteilung der biomechanischen Belastung die mittlere Fahrzeugbeschleunigung und/oder die Geschwindigkeitsänderung während der gesamten Kollisionsdauer herangezogen werden. Bei der Belastung in einem fahrenden, seitlich angestoßenen Pkw kann jedoch eine erhebliche genauere Betrachtung erforderlich sein.

Bei einem Kreuzungsunfall, bei dem ein Fahrzeug frontal in die Seite eines anderen hineinfährt, führt dieses unter Umständen zu einer temporären Verhakung der Fahrzeuge. Dieses ist durch die Beschaffenheit der Fahrzeugseite zu erklären. Die Flanke eines Pkw ist in Bereiche sehr hoher und sehr niedriger Struktursteifigkeit zu unterteilen. Als struktursteife Bereiche sind die Räder sowie die A-, B- und C-Säulen anzusehen. Die strukturweichen Teile sind die Kotflügel und die Türblätter.

Temporäre Verhakungen haben zur Folge, dass die Fahrzeugbeschleunigungen in Quer- und Längsbeschleunigung zeitlich nicht synchron auftreten. Vielmehr weisen die Beschleunigungssignale einen zeitlichen Versatz auf. Man muss daher zur Beschreibung der biomechanischen Insassenbelastung die Eindringungsphase von der Verhakungsphase getrennt betrachten. Anders als bei Front-/Heckkollisionen können je nach Geschwindigkeiten der beteiligten Fahrzeuge erheblich ausge dehntere Kollisionsdauern auftreten, und zwar bei Kreuzungskollisionen von bis zu ca. 0,4 s. Bei Seitenkollisionen im gleichgerichteten Verkehr, wie bei Spurwechseln, sind auch Kollisionsdauern von über 1 s zu beachten. Dieses tritt dann auf, wenn beide Fahrzeuge mit ähnlicher Geschwindigkeit fahren.

Bei derartigen Kollisionen kommt es zu Schwingungsbewegungen in Querrichtung, wobei die Richtung der Belastung wechseln kann. Erfolgt z. B. am Anfang einer Kollision eine Belastung von rechts auf das Fahrzeug, kann während der weiteren Kollisionsphase auch eine Belastung von links (durch Wankbewegungen) und dann wiederum von rechts einwirken. Würde man nun über den gesamten Zeitraum der Kollision einen Mittelwert bilden, so käme man zu keiner vernünftigen Größenordnung der Querbelastung und es würde sich ein viel zu geringer Wert ergeben. Die entscheidende Belastung zu Beginn der Kollision würde sich mit dem Zurückwanken des Fahrzeuges aufheben. In Becke et al. (1999) wurde daher empfohlen, zur Ermittlung der Belastung nicht die Kollisionsdauer, sondern nur die Zeitdauer der Hauptbelastung zu berücksichtigen. Will man die biomechanische Belastung beschreiben, so ist man darauf angewiesen, die mittlere Querbeschleunigung

bzw. die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung in Quer- und in Längsrichtung getrennt zu ermitteln, und zwar nicht für den Bereich der gesamten Kollisionsdauer, sondern für den Bereich der Hauptbelastungsdauer.

Bei Seitenkollisionen ist von völlig unterschiedlichen Insassenbewegungen auszugehen, je nachdem ob es sich um einen Insassen auf der stoßzugewandten oder stoßabgewandten Seite handelt. Die von Becke et al. (1999) vorgestellten Versuchsergebnisse haben ergeben, dass für die stoßzugewandten sitzenden Insassen ein Schulteranstoß an der Türverkleidung und ein leichter Kontakt des Kopfes an der Seitenscheibe oder der B-Säule schon bei sehr kleinen kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung Δv quer zur Fahrzeuglängsachse erfolgen kann. Dabei hat die Größe des Insassen und die Formgebung des Insassenraumes einen erheblichen Einfluss. Bei einem seitlichen Bewegungsfreiraum von beispielsweise nur 10 cm reicht eine kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung Δv von 3 km/h schon aus, um einen Kopfanstoß zu erzeugen. Der Kopfanprall erfolgt maximal mit einer Geschwindigkeit, die geringfügig unterhalb der Geschwindigkeitsänderung des Fahrzeugs in diesem Bereich liegt. Kommt es zuerst zum Schulteranprall, so wird der Oberkörper des Insassen dann ungefähr auf die Geschwindigkeit des Fahrzeugs in Querrichtung beschleunigt, der Kopf hat zu diesem Zeitpunkt noch keine Quergeschwindigkeit aufnehmen können. Es kommt zu einer Relativbewegung zwischen Kopf und Rumpf.

Die Betrachtung in Querrichtung lässt sich in vielen Fällen jedoch nicht isoliert vornehmen, da der Querbelastung auch eine Längsbelastung überlagert ist. Je nach Beanspruchungsrichtung kann dieses eine zusätzliche Belastung entsprechend einer Frontalkollision oder auch einer Heckkollision sein. Kommt es zu einer Zusatzbelastung, wie bei einer Frontalkollision, so ergibt sich durch Überlagerung mit der Querbewegung unter Umständen ein veränderter seitlicher Bewegungsfreiraum. In normaler Sitzposition kann der Fahrzeuginsasse beispielsweise mit dem Kopf neben der B-Säule sitzen. Bei der o. g. Bewegung vergrößert sich sein seitlicher Bewegungsfreiraum bis zur weiter außen liegenden Seitenscheibe.

Für den auf der stoßabgewandten Seite sitzenden Insassen kommt es zu einer völlig anderen Bewegung. Die Querbewegung des Fahrzeugs wird dem Insassen im wesentlichen über die Sitzfläche aufgezwungen. Hierdurch kommt es nur zu einer gewissen Relativbewegung zwischen Kopf und Rumpf. Eine deutliche Seitenneigung der Halswirbelsäule gegenüber dem Rumpf ist nicht zu beobachten. Demzufolge ist eine verletzungsinduzierende Belastung der Halswirbelsäule bei leichten Seitenkollisionen im Pkw zeitlich vor einem Kopf- oder Schulterkontakt nicht zu erwarten, jedoch noch nicht abschließend sicher zu beurteilen. Somit sind die unterschiedlichen Gegebenheiten für den Insassen auf der stoßzugewandten und auf die stoßabgewandten sitzenden Seite zu beachten.

Verglichen mit der Heckkollision ist daher die unfallanalytische Beschreibung der Beanspruchung auf das Fahrzeug und damit auf den Insassen nur mit erheblich größerem Aufwand und mit noch viel größerem Detailwissen, gewonnen aus Crash-Tests mit entsprechender Messvorrichtung, möglich.

Die Fahrzeugüberschläge

Bei Fahrzeugüberschlägen, zumeist durch Rotationen um die Fahrzeuglängsachse gekennzeichnet, kommt es in vielfältiger Weise zu häufig nicht näher zu bestimmenden Beanspruchungen in Querrichtung und, je nach Körpergröße, auch zu Beanspruchungen in senkrechter Richtung, durch Kontakte zwischen Kopf und Dach. Diese Konstellation ist bei der Beurteilung von „HWS-Schleudertrauma“ äußerst selten zu beurteilen. Die Beanspruchungen in Querrichtung, die man aus Versuchen vergleichend ermitteln kann, liegen in der Regel

weit über den Beanspruchungen, die bei leichten Seitenkollisionen üblicherweise zur Begutachtung vorgelegt werden.

Auch hier gilt, dass ohne vergleichende Versuche kaum eine Aussage des Unfallanalytikers zur Belastung gemacht werden kann. Da darüber hinaus noch richtungsabhängige, stark wechselnde Beanspruchungen, mit sich zeitlich verändernden Insassenbewegungen, vorliegen, ist ein Fahrzeugüberschlag ein im Detail häufig nicht befriedigend zu beschreibender Ablauf von Beanspruchungen. Auch hier ist gleichzeitig eine Belastung von vorn oder hinter zu beachten. Hilfsweise kann hier noch die Statistik zu Überschlägen aus Unfallgeschehen herangezogen werden, wobei beispielsweise die Größe des Insassen, die den Abstand zwischen Kopf- und Dachpartie bestimmt, ein wesentliches Kriterium für Verletzungen der HWS darstellt.

Die Bremsvorgänge

Hin und wieder werden auch „HWS-Schleudertrauma“ durch Bremsvorgänge beklagt. Die Belastungen, die auf einen Insassen bei einem Bremsvorgang einwirken, sind für den Techniker problemlos zu beschreiben. Für Vollbremsungen auf trockener Fahrbahn kann die Fahrzeugverzögerung mit 7 bis 8 m/s^2 , in speziellen Fällen auch mit Werten bis zu 10 m/s^2 beschrieben werden. Im Vergleich mit Kollisionen handelt es sich dabei um sehr geringe Beanspruchungen. Bei einer Kollision mit einer kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung von beispielsweise $\Delta v = 10$ km/h tritt schon eine sehr viel höhere mittlere Fahrzeugbeschleunigung von etwa 3 g (ungefähr 30 m/s^2) auf.

Es ist allerdings darauf hinzuweisen, dass sich die Beanspruchungsdauer bei einem Bremsvorgang von einer durchschnittlichen Kollisionsdauer stark unterscheidet. Um aus einer Geschwindigkeit von 50 km/h mit einer Vollbremsung bis zum Stillstand abzubremsen, wird eine Zeitdauer von rund 2 s benötigt. Im Vergleich zu einer durchschnittlichen Kollisionsdauer bei einer Front-/Heckkollision ist sie damit 20 mal so lang. Für die mögliche Relativbewegung im Innenraum spielt dieses eine große Rolle. Sitzt ein Beifahrer ohne einen Sicherheitsgurt ungesichert im Fahrzeug und wird er vom Bremsvorgang überrascht, so wird er nach vorn vom Sitz herunterrutschen und einen Anprall im Fahrzeuginneren erleiden. Für einen durch einen Dreipunkt-Sicherheitsgurt geschützten Insassen gilt dieses natürlich nur in dem Umfang, wie es die Gurtlose des Gurtes zulässt. Für einen derartigen Vorgang ist demzufolge die Frage nach der Benutzung des Sicherheitsgurtes von entscheidender Bedeutung.

Prallt ein Fahrzeug auf ein anderes Fahrzeug auf und erfährt dadurch eine kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung von rund 3 km/h, so tritt eine Fahrzeugverzögerung auf, wie sie einer Vollbremsung entspricht. Versuche zeigen, dass die Kollisionsdauer und damit die Einwirkdauer jedoch so kurz ist, dass auch der unvorbereitete Insasse seinen Sitz dabei nicht verlässt und seine Sitzposition nur unwesentlich verändert. An dieser Stelle ist die Einwirkdauer somit wesentlich.

Der Spurwechsel

Eine seitliche Beanspruchung für den Insassen ergibt sich nicht nur durch eine seitliche Kollision, sondern beispielsweise auch durch Kurvenfahrt oder einen plötzlichen Spurwechsel. Auch hier werden „HWS-Schleudertraumata“ beklagt.

Sinngemäß gilt hier das gleiche wie bei Vollbremsungen. Die maximale Querbeschleunigung kann Werte von rund 7 bis 8 m/s^2 erreichen, gleichbedeutend mit einer Belastung, wie sie bei einer kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung von 3 km/h in der Hauptbelastungsdauer einer Kollision auftritt. Wie schon zuvor erwähnt, kommt es bei einem Unfall mit einer kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung in Querrichtung von unter 3 km/h im allgemeinen nicht zu einer Kollision des Kopfes im Bereich der Seitenscheibe, auch

nicht bei einem Insassen, der auf der stoßzugewandten Seite sitzt. Bei einem plötzlichen, sehr rabiaten Spurwechsel hingegen gelingt dies schon. Die Insassen können einen Schulter- und Kopfaufprall im Bereich der Seitenscheibe erleiden, wenn sie auf diesen Ausweichvorgang nicht vorbereitet waren. Die maximale Kopfaufprallgeschwindigkeit hängt von der Zeitdauer ab, die der Insasse benötigt, um aus der zuvor eingenommenen Sitzposition in die Aufprallsituation im Bereich der Seitenscheibe zu gelangen. Je näher er sich zunächst an der Seitenscheibe befand, desto geringer ist die Aufprallgeschwindigkeit.

Der Bordsteinprall

Von Zeit zu Zeit kommt es nach Fahrzeug-Fahrzeug-Kollisionen noch zum Bordsteinaufprall. Welche Belastungen dabei auftreten, hängt vom Geschwindigkeitsniveau, vom Anprallwinkel, von der Reifengröße, vom Reifenluftdruck, von der Bordsteinhöhe und vom Bremszustand ab. Im Versuch kann die zu beurteilende Situation leicht nachgestellt und mit entsprechenden Messwerten beschrieben werden. Ein Bordsteinanprall bei ca. 30 km/h mit voll abgebremsten, blockierten Rädern unter einem Winkel von 5°, bei dem das Fahrzeug nicht den Bordstein überwindet, führte beispielsweise zu einer mittleren auftretenden Querschleunigung von ca. 8 m/s² und einer kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung von knapp 3 km/h bei einer Kollisionsdauer von 0,10 s.

IV. Zur orthopädisch-traumatologischen Beurteilung

Im nachfolgenden Teil dieses Aufsatzes werden die orthopädisch-traumatologischen Konsequenzen der Unfallanalyse besprochen. Während der letzten Jahrzehnte beschäftigten sich zahlreiche Studien mit dem Phänomen der „HWS-Schleudertraumata“, insbesondere infolge eines Auffahrunfalls. Bis zum heutigen Tage wurde jedoch weder der Verletzungsmechanismus bestimmt, noch konnte ein festes Verletzungskriterium ermittelt werden.

Die Heckkollision

Geschichtlich gründen sich die wissenschaftlichen Untersuchungen zu „HWS-Schleudertraumata“ auf die Beanspruchung durch Heckkollisionen.

– Der Verletzungsmechanismus

Um den Verletzungsmechanismus zu finden, wurden in der Vergangenheit Leichenversuche durchgeführt, Versuche mit Teilen von Wirbelsäulen sowie Tierversuche. Insbesondere die Leichenversuche eignen sich naturgemäß nicht dazu, den Mechanismus für leichte HWS-Verletzungen festzustellen.

Bis heute wird von vielen Beteiligten, die sich mit dem Thema „HWS-Schleudertrauma“ auseinandersetzen, angegeben, dass die Überstreckung der Halswirbelsäule (Hyperextension) für die nachfolgende Beschwerdesymptomatik verantwortlich ist. Jedoch insbesondere neuere Untersuchungen *Castro et al.* (1997), *Grauer et al.* (1997) zeigen, dass bei einer Heckkollision eine translatorische Relativbewegung (Gleitbewegung) zwischen Kopf und Rumpf auftritt, wobei sich die HWS, wie *Grauer et al.* (1997) nachwiesen, s-förmig verbiegt. Aufgrund dieser s-förmigen Verbiegung treten verschiedene Positionsveränderungen im Bereich der unteren und oberen HWS auf. Inwiefern diese zu einer Verletzung der HWS führen können, ist momentan noch nicht abschließend wissenschaftlich gesichert.

– Die biomechanische Insassenbelastung

Die Untersuchungen zu dieser Thematik sind in sog. „Blackbox“-Untersuchungen (z. B. *Castro et al.*, 1997) und „Detailuntersuchungen“ (z. B. *Grauer et al.*, 1997) zu unterteilen. Derartige „Blackbox“-Untersuchungen wurden im vergangenen Jahrzehnt in größerer Anzahl durchgeführt. Es wurden Freiwillige in Fahrzeuge gesetzt, die dann einer Heckkollision ausgesetzt wurden. Gemessen wurde dabei die Relative-

geschwindigkeit und insbesondere die sogenannte kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung sowie die Fahrzeugbeschleunigung über die Zeit. Die genaueren Umstände unter denen diese Versuche stattfanden, sind jeweils näher beschrieben. Als Ergebnis wurde formuliert, dass bei Fahrzeug-Fahrzeug-Heckkollision bis zu bestimmten Geschwindigkeitsänderungen (Δv) Beschwerden der Versuchspersonen nicht geäußert, bzw. Befunde nicht festgestellt wurden.

Was sich innerhalb der Black-Box abspielt, wurde weitergehend nicht analysiert. Zwar wurden teilweise Versuche durchgeführt, in das Innere dieser Black-Box einzudringen, in dem weitere messbare Details, wie beispielsweise Kopfbeschleunigungsverlauf, Brustbeschleunigungsverlauf, Bewegungsbahnen und dergleichen gemessen wurden, jedoch sind dabei die vielfältigen Einflussmöglichkeiten auf die Verletzung im Detail nicht hinreichend untersucht worden.

Im wesentlichen hat man sich darauf beschränkt, eine annähernd normale Sitzposition unterschiedlich großer Probanden in unterschiedlichen Fahrzeugen und Fahrzeugsitzen zu überprüfen. Sowohl weibliche als auch männliche Versuchspersonen waren beteiligt, wobei unterschiedliche Lehnenneigungen, Lehnenelastizitäten, unterschiedliche Kopfstützenformen und unterschiedliche Kopfstützenstellungen vorkamen. Es sind Versuche mit weitgehend abgeschirmten Insassen durchgeführt worden, genauso wie Versuche mit vorbereiteten Insassen. Bei diesen international durchgeführten Freiwilligenversuchen haben sich insgesamt 240 Fahrzeug-Fahrzeug-Versuche ergeben, *Meyer et al.* (1999), bei denen Freiwillige im heckseitig angestoßenen Versuchsfahrzeug saßen. Hinzu kommen in großer Anzahl Laborversuche (Schlittentests).

Als Ergebnis hat sich herausgestellt, dass der sogenannte, mittlerweile international anerkannte Wert der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung Δv zur Beschreibung der biomechanischen Insassenbelastung bei einem Heckanstoß geeignet ist.

Bei allen Versuchen bis 1996 wurden Geschwindigkeitsänderungen in einem Bereich zwischen 2 und 13 km/h gemessen, ohne dass im Anschluss daran bei diesen Freiwilligen objektivierbare Verletzungen oder länger andauernde Beschwerden aufgetreten waren. Nach *Szabo und Wélcher* (1996) sind kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderungen von bis zu 9 km/h nicht geeignet, signifikante Verletzungen an der Halswirbelsäule hervorzurufen.

In einer interdisziplinären Studie (*Castro et al.*, 1997; *Meyer et al.*, 1999) wurde festgestellt, dass bis zu einer kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung von 11 km/h keine Beschwerden auftraten. Bei dieser Studie waren 14 Männer zwischen 28 und 47 Jahren, 5 Frauen zwischen 26 und 37 Jahren beteiligt. Es wurden 17 Pkw-Pkw-Kollisionen und zum Vergleich 3 Autoskooter-Kollisionen durchgeführt. Die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung lag zwischen 8,3 und 14,2 km/h bei einer mittleren Kollisionsdauer von 0,12 s. Die Zellenbeschleunigung bei den Pkw-Pkw-Kollisionen lag im Mittel bei 2,7 g. Es erfolgte ein Vergleich zwischen dem Beschleunigungsverlauf über der Zeit und der mittleren Beschleunigung von Autoskootern mit den erfolgten Pkw-Pkw-Kollisionen. Dabei wurden eine sehr gute Übereinstimmung des Beschleunigungsverlaufes und der mittleren Beschleunigung bei vergleichbarem Δv festgestellt. Die Kollisionsdauer wurde auch bei den Autoskooter-Kollisionen im Mittel mit 0,12 s gemessen.

Vor und nach dem Crash wurden 18 der 19 Probanden medizinisch u. a. mit kernspintomographischer Untersuchung untersucht. Die Sitzlehnen wurden in großer Bandbreite entsprechend der vorgefundenen Neigung im Privat-Fahrzeug eingestellt. Der horizontale Abstand der Kopfstütze zum Kopf betrug bis zu 17 cm, der vertikale Abstand bis zu 11 cm bei einem Neigungswinkel der Rückenlehne von bis zu 110°, so

dass sehr große Abweichungen von einer optimalen Einstellung auftraten. Das von hinten angestoßene Fahrzeug stand mit eingelegetem ersten Gang und angezogener Handbremse. Die Kollisionen fanden mit 100%, 85%, 75% und 30% Überdeckung statt.

Einen Tag nach dem Crash schilderten vier männliche Probanden und eine Probandin Beschwerden. Die von diesen Probanden erlittenen kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderungen lagen zwischen 11,4 und 14,2 km/h. Es wurden jedoch keine gesicherten Verletzungsfolgen und keinerlei durch die Versuche verursachten Veränderungen in der Kernspintomographie festgestellt. Bis auf leichte Einschränkung der Linksrotation eines Probanden, die bis zu zehn Wochen nach dem Crash bestand, waren die anderen Beschwerden nach 1 bis 7 Tagen abgeklungen. Zu keiner Zeit war einer der Probanden trotz subjektiv empfundener Beschwerden in der Ausübung seiner beruflichen Tätigkeit gehindert.

Bei diesen Versuchen hatte man sich um möglichst realistische Nachstellung eines Unfalls bemüht. Die Probanden waren über eine Augenklappe und Rockmusik von der Umgebung abgeschirmt. Mittels EMG-Signalen wurden Muskelanspannung im Nackenbereich gemessen. Es wurde eine typische Unterfahrtsituation nachgestellt, bei der das auffahrende Fahrzeug mit der Stoßstange unter die Stoßstange des anderen Fahrzeuges geriet, so dass man diese Versuche als „Black-Box“ für die Nachstellung für realistische Auffahrkollisionen verwenden kann, indem man postuliert, dass bei einer kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung bei vergleichbaren Auffahrkollisionen eine Verletzung der Halswirbelsäule bis zu einem Wert Δv von 11 km/h im Normalfall (d. h. gesunder Betroffene, normale Sitzposition zum Zeitpunkt der Kollision) äußerst unwahrscheinlich ist.

Brault et al. (1998) berichteten über eine weitere Studie, bei der eine vergleichbare Vorgehensweise vorlag. Es handelte sich um eine Untersuchungsgruppe von 42 Personen, die über eine lokale Zeitung rekrutiert wurden. Männer und Frauen waren in gleicher Zahl repräsentiert. Das Alter lag zwischen 20 und 40 Jahren. Die Testpersonen wurden einer Heckkollision mit einer kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung von 4 km/h und auch zusätzlich von 8 km/h ausgesetzt. 29% der Testpersonen zeigten bereits bei einer kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung von 4 km/h und sogar 38% der Testpersonen bei einer kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung von 8 km/h „HWS-Schleudertrauma“-ähnliche Beschwerden von minimaler Intensität und relativ kurzer Dauer mit Zervikalsymptomen und Kopfschmerzen.

Vergleicht man nun diese Ergebnisse mit den Ergebnissen von Castro et al. (1997), fällt sofort die Diskrepanz auf. Auf den ersten Blick kann diese Diskrepanz nicht erklärt werden. Eine nähere Betrachtung zeigt jedoch, dass es vom Ansatz her aus orthopädisch-traumatologischer Sicht sehr zweifelhaft ist, ob eine kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung von 4 km/h bei einer so großen Anzahl von Testpersonen bereits zu Beschwerden führen kann, weil eine kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung von 4 km/h eine Belastung bedeutet, der eine normale Person alltäglich bei verschiedensten Bewegungen auch ausgesetzt sein kann. Daher wurde eine neue interdisziplinäre Untersuchung (Zusammenarbeit der *Akademie für Manuelle Medizin* an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, des Ingenieurbüros *Schimmelpfennig und Becke*, der *Abteilung Prävention und Rehabilitation* der Ruhr-Universität Bochum, des *Institutes für Rechtsmedizin* der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, der Rechtsanwaltskanzlei Dr. König und Partner aus Münster, des Facharztes für Orthopädie Herrn Dr. M.F. Hein) durchgeführt, bei denen Freiwillige einer simulierten Heckkollision ausgesetzt wurden (Castro et al., 1999). Die Arbeitshypothese dieser Untersuchung war, dass auch bei einer simulierten Heckkollision ein bestimmter Prozentsatz von Test-

personen Beschwerden angeben würden. Ähnlich wie bei der Untersuchung von Brault et al. (1998) wurden die Testpersonen für die simulierte Heckkollisions-Studie aus der Bevölkerung mittels einer Anzeige in lokalen Zeitungen rekrutiert.

Insgesamt konnten 51 freiwillige Testpersonen an diese Studie teilnehmen. Sie wurden vor dem Versuch medizinisch und psychologisch untersucht.

Das direkte „Crash-Erlebnis“, das die Probanden erlebten, entsprach optisch, akustisch und taktil weitgehend einer tatsächlichen Kollision. Die Probanden wurden in ein vorbereitetes Fahrzeug gesetzt, das am Heck schon vorbeschädigt war. Die Sicht auf den herannahenden Pkw war durch einen Vorhang verdeckt. Akustisch konnten die Probanden die Annäherung des auffahrenden Pkw durch das aufheulende und sich nähernde Motorgeräusch wahrnehmen. Das anschließende Kollisionsgeräusch simulierte ein im Kofferraum angebrachtes Fallgewicht, das zu einer Körperschallübertragung auf das Fahrzeug und gleichzeitig taktil zu einer Erschütterung führte. Eine durch das Fallgewicht zersplitternde Flasche verbesserte die akustische Nachbildung.

Damit die Probanden den Eindruck hatten, dass tatsächlich eine Kollision stattfand, rollte der Wagen von einer durch den Vorhang verdeckten 60 mm hohen Rampe, die sich unter den Hinterrädern befand, herunter.

Die für die Simulation benötigte Komponenten waren für den Probanden nicht sichtbar, von ihm war nur ein aufwendiger Versuchsaufbau zur Unfallanalyse mit computergestützter Crash-Datenerfassung und Unfalldatenspeicher, Videokameras und Lichtschranken wahrnehmbar. Die bei dieser Simulation entstandenen Beschleunigungen und Bewegungen im Bereich der Halswirbelsäule, vornehmlich des Kopfes und der Brust wurden durch Beschleunigungsaufnehmer festgehalten. Im Anschluss an die Simulation wurde den Probanden nach Entfernung der Rampe und des Vorhanges eine Situation gezeigt, wie sie sich nach einem normalen Auffahrnfall darstellt. Zwei beschädigte Fahrzeuge standen dicht hintereinander. Auf der Fahrbahn lagen Glassplitter der Beleuchtungseinrichtungen.

Der Versuchsaufbau hinterließ auf die Probanden einen überzeugenden Eindruck, da keiner der Freiwilligen bemerkte, dass ein Auffahrnfall nur simuliert wurde. Direkt nach dem Ereignis berichteten neun Versuchspersonen (17,6%) über Beschwerden. Innerhalb der nächsten drei Tagen hatten 10 von 51 Freiwilligen (19,6%) und über 4 Wochen vier Freiwillige (7,8%) Beschwerden (von diesen letzteren vier gaben zwei jedoch an, dass die Beschwerden unabhängig von dem Versuch waren).

Im Rahmen der psychologischen Auswertung wurde eine Diskriminanz-Analyse durchgeführt. Die Diskriminanz-Analyse erlaubt die gleichwertige Berücksichtigung der 4 in der Studie benutzten psychologischen Prädiktoren für die Vorhersage, ob ein Proband nach 4 Wochen Beschwerden haben wird oder nicht. In der vorliegenden Studie war dieses zu 93,6% der Fall.

Aus den Ergebnissen dieser Studie wurde gefolgert, dass bereits ca. 20% der Personen, die Heckkollision ohne biomechanische Belastung erleiden, „HWS-Schleudertrauma“-ähnliche Beschwerden angeben werden, obwohl keine wirkliche physische Verletzung existiert. Personen mit psychologischen Risikofaktoren werden dies eher tun.

Fasst man die Ergebnisse der o. g. „Blackbox“-Studien bzgl. der Heckkollisionen zusammen, hat die letztgenannte Studie eindeutig gezeigt, dass zu einem hohen Grad nicht die mechanische Beanspruchung, sondern auch die psychosomatische Beeinflussung eine Rolle spielt. Als Hypothese kann man formulieren, dass eine Kollision größerer Intensität auch einen größeren Eindruck hinterläßt und damit auch die psychosomatische Beeinflussung ansteigt, und zwar basierend auf den o. g. Ergebnissen der verschiedenen Studien:

0 km/h kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung – 19,6%;

4 km/h kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung – 29,0%;

8 km/h kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung – 38,0%.

Bei dieser Hypothese wird davon ausgegangen, dass es im Normalfall (d. h. gesunde Betroffene, normale Sitzhaltung zum Zeitpunkt der Kollision) äußerst unwahrscheinlich ist, dass eine morphologische Verletzung bei kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderungen von unter 11 km/h auftritt, somit auch sämtliche Beschwerden, die in der Studie von *Brault et al.* (1998) auftraten, psychosomatisch zu erklären sind. Man muss aufgrund der Ergebnisse der simulierten Heckkollisions-Studie außerdem fragen, ob sogar nicht die fünf Probanden mit Beschwerden in der Studie von *Castro et al.* (1997) psychosomatischen Reaktionen unterlegen waren.

Die Frontalkollision

Betrachtet man die verschiedenen Kollisionen, bei denen Beschleunigungsmechanismen der Halswirbelsäule beschrieben werden, steht die Heckkollision an erster Stelle. Dies soll jedoch nicht heißen, dass bei einer Frontalkollision keine Beschleunigungsmechanismen der HWS auftreten können. Nach *Kullgren et al.* (1999) resultierenden 1/3 der HWS-Fälle aus Frontalkollisionen.

Aus den Angaben der Literatur kann als Fazit festgehalten werden, dass die Belastbarkeit für die HWS bei der Frontalkollision höher ist als bei der Heckkollision. *Schuller und Eisenmenger* (1993) haben diese höhere Belastbarkeit für die HWS in ihrer Arbeit zum Ausdruck gebracht. So gaben sie biomechanische Toleranzkriterien und Toleranzgrenzen für die HWS-Hyperflexion (Anmerkung der Verfasser: so wie sie bei einer Frontalbelastung auftritt) an, mit einer Fahrzeugverzögerung von 5 g (dies entspricht in etwa einer kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung von 20 km/h).

Diese unteren Toleranzgrenzen gelten laut *Schuller und Eisenmenger* für junge Versuchspersonen mit gesunder Halswirbelsäule im definierten Crashtest. Es sind bis heute zwar Hypothesen geäußert worden, z. B. *Wittenberg et al.*, 1998, dass eine vorgeschädigte degenerierte HWS mehr oder weniger anfälliger ist für Verletzungen, dieses ist jedoch nie wissenschaftlich gesichert worden (siehe auch Kapitel Diskussion). Wir sind dann auch der Meinung, dass diese Angaben von *Schuller und Eisenmenger* in der Regel zunächst einmal bei der Auswertung von Frontalkollisionen nicht nur bei jungen Versuchspersonen angewendet werden können.

Der Gurtschlitten

Seit den siebziger Jahren werden Gurtschlitten bei öffentlichen Veranstaltungen eingesetzt, um der Bevölkerung die Wirkung von Dreipunkt-Sicherheitsgurten nahezubringen.

Eine Untersuchung von drei repräsentativen Gurtschlitten bezüglich der auftretenden Belastungen ergab „kollisionsbedingte“ Geschwindigkeitsänderungen von 8,9 bis 14,9 km/h. Dabei traten größere mittlere Verzögerungen von 34,7 m/s² bis 210 m/s², als bei Pkw-Pkw-Kollisionen, auf, *Winninghoff et al.* (2000). Die Belastungsrichtung entspricht der einer Frontalkollision.

Eine Abschätzung der im Jahre 1999 gegebenen Benutzung der 20 bekannten Gurtschlitten führte auf ca. 25 000 Freiwillige pro Jahr. Uns sind keine Meldungen von HWS-Verletzungen bekannt.

Die Seitenkollision

Zu Seitenkollisionen liegen zur Zeit kaum systematische Untersuchungen über die Auswirkung unterschiedlich einwirkender Belastungen vor. Erste Anfänge wurden von *Becke et al.* (1999) veröffentlicht. Es wird an dieser Stelle auf die Seite 229 und folgende dieses Beitrages verwiesen. Aus orthopädisch-traumatologischer Sicht wird es von Bedeutung sein, ob der

Betroffene an der stoßzugewandten bzw. stoßabgewandten Seite gesessen hat. Im letzteren Fall schwingt der Betroffene mehr oder weniger „in den freien Innenraum des Pkw“ durch die Kollision. Versuche auf der Crash-Anlage zeigen, dass auch hierbei gewisse Relativbewegungen zwischen Kopf und Rumpf auftreten können. Ob diese auch verletzungsrelevant sind, kann noch nicht abschließend bewertet werden.

Wie bereits vorher erwähnt, kann es auch bei einer stoßzugewandten Sitzposition zu einer Belastung der HWS aufgrund einer Relativbewegung zwischen Kopf und Rumpf kommen. Unter den üblichen Bedingungen im Fahrzeug kommt es zu einer kurzzeitigen seitlichen Halswirbelsäulenbelastung, die zeitlich zwischen dem Schulter- und dem Kopfanprall liegt. Dieses wäre dann eine vergleichbare Situation, wie bei der Heckkollision: es wäre im Ansatz eine translatorische Relativbewegung zu betrachten. Anschließend tritt eine Neigung des Kopfes zur Seite auf. Eine translatorische Relativbewegung ist bei der Seitneigung aufgrund der Anatomie der HWS jedoch deutlich eingeschränkter als bei einer Heckkollision. Somit ist es bei Seitenkollisionen, bei denen ein Schulter-/Kopfanprall auftritt, denkbar, dass es zu einer Verletzung auch von Gelenkstrukturen der Halswirbelsäule kommen kann. Neuere Untersuchungen (*Becke und Castro*, 2000) zeigen bei stoßzugewandten Insassen auch Abknickmechanismen der HWS. Auch hierbei sind Verletzungen von HWS-Strukturen denkbar.

Wo jedoch exakt die biomechanische Belastungsgrenze für das sichere Auftreten einer Verletzungsmöglichkeit der HWS bei der Seitkollision liegt, kann zwar im Rahmen der ersten Ansätze tendentiell festgehalten werden, jedoch wie auch die EWAK (1999) angegeben hat, kann aus den wenigen Versuchen noch keine wissenschaftlich gesicherte Aussage abgeleitet werden. Wir sind auf jeden Fall der Meinung, dass insbesondere bei stoßzugewandten aber auch bei stoßabgewandten Seitenkollisionen vorsichtig über das Beschwerdebild eines Betroffenen geurteilt werden sollte. Pauschalaussagen wie „eine Verletzungsmöglichkeit der HWS bei der Seitenkollision gibt es nicht“ sind unseres Erachtens nicht mehr aufrecht zu halten.

V. Diskussion

Wie eingangs schon erwähnt, wird aus den Blackbox-Versuchen zur Zeit international anerkannt der Schluss gezogen, dass insbesondere bei Heckkollisionen mit Δv -Werten unter einem bestimmten Grenzwert im Normalfall (d. h. gesunder Betroffene, normale Sitzposition zum Zeitpunkt der Kollision) Verletzungen höchst unwahrscheinlich sind oder keine morphologisch schädigende Erklärung finden.

Jedoch schon die Art der Formulierung dieses Ergebnisses schwankt von einem Sachverständigen zum anderen Sachverständigen zwischen „mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit“ und „der Sachverständige kann aus medizinischer Sicht eine Verletzung nicht erklären“.

Nahezu sämtliche Literatur zur „HWS-Schleudertrauma“-Thematik bezieht sich auf den Heckaufprall. Zu dieser Thematik werden zur Gültigkeit einer Harmlosigkeitsgrenze Meinungen als feststehende Erkenntnisse dargestellt, obgleich häufig ein Beweis für den behaupteten Zusammenhang noch nie erbracht wurde. Darüber hinaus werden Einflüsse beschrieben, die bei der Beurteilung zu berücksichtigen seien. Diese Einflüsse werden immer nur qualitativ benannt, nie quantitativ. Dieses hat auch seinen Grund, da derartige Erkenntnisse fehlen. Als Beispiel:

Es werden fahrzeugspezifische Einflüsse wie z. B. Sitzkonstruktion, Elastizität der Lehne und Ausbildung und Einstellung der Kopfstütze erwähnt. Bleibt man bei der Kopfstütze, so wird als spezieller Einfluss der horizontale Abstand zwischen Kopf und Kopfstütze als gravierend bezeichnet.

Allgemein lässt sich nachlesen, dass sich ein großer horizontaler Abstand ungünstig auswirkt. Nach den hiesigen Messungen scheint dieses richtig zu sein.

Es ist jedoch kaum möglich, eine Angabe darüber zu machen, wie sich denn nun durch den horizontalen Abstand zwischen Kopf- und Kopfstütze die „Harmlosigkeitsgrenze“ verschiebt.

Gleiches gilt auch für personenspezifische Einflüsse, wie z. B. Größe, Konstitution, Alter und Geschlecht. Es gibt Äußerungen (z. B. *Wittenberg et al.*, 1998), die darauf hindeuten, dass bei einer Verletzung der HWS insbesondere die vorgeschädigten Wirbelsäule, mehr oder weniger verletzungsanfälliger ist. Ein strenger wissenschaftlicher Beweis für diese Behauptung ist hingegen noch nie erbracht worden. Es gibt in der Literatur dann auch ebenfalls Arbeiten (z. B. *Münker et al.*, 1995) die diese Korrelation nicht nachweisen können.

Häufig wird auch berichtet, dass Frauen auf einen Beschleunigungsmechanismus der Halswirbelsäule empfindlicher reagieren, als Männer. Nach *Otte et al.* (1998), der über Auswertungen aus Erhebungen am Unfallort mit über 4953 gurtgeschützten verletzten Insassen berichtete, wurden 1238 Personen mit HWS-Distorsionen beklagt. Er fand keinen Einfluss des Alters in Verbindung mit der Körpergröße der Person auf die Entstehungswahrscheinlichkeit einer HWS-Distorsion. Es ergab sich aber, dass von allen HWS-Verletzten auf die Personen weiblichen Geschlechts etwa 58% und auf die männlichen Geschlechts ungefähr 42% entfielen. Bei der Deutung dieses Ergebnisses wies er aber darauf hin, dass Frauen bei diesen Unfällen häufiger in kleinen und leichten Autos saßen. Damit ist eine Vergleichbarkeit schon nicht gegeben, da leichte Fahrzeuge bei gleicher Relativgeschwindigkeit zum auffahrenden Fahrzeug eine höhere kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung erreichen und somit die Frauen statistisch gesehen häufiger einer höheren Belastung ausgesetzt gewesen sein dürften als die Männer.

Oft wird auch diskutiert, dass bei Versuchen die Probanden eine gewisse Erwartungshaltung einhielten. Es wird behauptet, die Versuchungsergebnisse könnten nicht übertragen werden, da im realen Unfallgeschehen eine derartige Erwartungshaltung häufig nicht bestünde. Bei einer Kollision ohne Erwartungshaltung würden schon bei geringerer Belastung „HWS-Schleudertraumata“ entstehen.

Zunächst einmal ist der Diskussionspunkt, dass bei sämtlichen Versuchen die Probanden eine Erwartungshaltung einnahmen, sicherlich nicht vollständig richtig. In der Studie von *Castro et al.* (1997) wurden die Probanden durch eine Augenklappe und durch einen Walkman mit Rockmusik von der Umgebung abgeschirmt. Die Probanden mussten sehr lange auf den Crash warten, wobei die entspannte Halsmuskulatur über EMG-Signale überprüft werden konnte.

Wird über die Erwartungshaltung gesprochen, so wird versteckt wahrscheinlich davon ausgegangen, dass ein Mensch, der eine Kollision erwartet, schon die Muskulatur anspannt, um sich zu schützen. Durch die EMG-Signale konnte festgestellt werden, dass bei den Versuchen in der Studie von *Castro et al.* (1997) die Probanden ihre Nackenmuskulatur eben nicht anspannten, weil dieses über einen derartig langen Wartezeitraum von vielen Minuten nicht möglich ist. Darüber hinaus ist es bis zum heutigen Zeitpunkt überhaupt nicht erwiesen, ob sich eine angespannte Muskulatur zum Zeitpunkt der Beaufschlagung positiv oder negativ bei der Entstehung eines leichten „HWS-Schleudertraumas“ auswirkt. Die Betonung soll dabei auf dem Begriff „leicht“ liegen.

Wie falsch unbewiesene Behauptungen sein könnten, zeigt das häufig anzutreffende Postulat, dass eine vorgebeugte Sitzposition zu einer Herabsetzung der „Harmlosigkeitsgrenze“ führen würde. Zur Zeit wird dieses Argument von Sachverständigen und auch von Rechtsanwälten benutzt.

Eine von uns durchgeführte Untersuchung (FIP-Studie) zu dieser Thematik im Zuge einer Diplomarbeit (1998) hat gezeigt, dass für kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderungen von bis zu Δv von etwa 7,7 km/h, (nur in diesem Bereich wurden die Untersuchungen angestellt) diese Aussage offensichtlich unrichtig ist (*Meyer et al.*, 1999).

Die Untersuchung führte zu dem zunächst verblüffenden Ergebnis, dass die Belastung des Insassen um so geringer war, je stärker die Person zum Kollisionszeitpunkt vorgebeugt war. Bei der Vergabe der Arbeit war zunächst davon ausgegangen worden, dass sich exakt ein gegenteiliges Ergebnis, wie in der Literatur beschrieben, ergeben würde, nämlich, dass der Oberkörper durch den größeren Abstand zur Rückenlehne „Schwung“ holt und hier eine ungünstigere Belastung vorliegt.

Die Analyse des Bewegungsablaufes ergab, dass bei den vorgebeugten Positionen im Gegensatz zur normalen Sitzhaltung ein Abrollen des Rückens auf der Rückenlehne des Sitzes stattfindet. Eine geringere Kopfaufprallgeschwindigkeit auf der Kopfstütze erklärt sich dadurch, dass sich während des Aufrichtvorganges des Oberkörpers die Relativgeschwindigkeit zwischen Fahrzeug und Oberkörper der Person schon annähert, so dass beim eigentlichen Anprall des Rückens und des Kopfes die ursprünglich vorhandene Relativgeschwindigkeit nicht mehr vorhanden ist. Aufgrund des späteren Anpralls nahm die mittlere Beschleunigung der Brust und des Kopfes bis zum Kontakt mit der Lehne bzw. der Kopfstütze mit zunehmend vorgebeugter Sitzhaltung ab. Zum Vergleich: bei einer kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung von Δv von ungefähr 7 km/h lag die aus dem Anprall an die Kopfstütze hervorgerufenen mittlere Kopfbeschleunigung bei der normalen Position bei ca. 6 g, bei der nach vom geneigten Position bei ca. 4,5 g und bei der extrem nach vom gebeugten Sitzhaltung noch bei ca. 2,6 g. Auch subjektiv konnte jeder Freiwillige feststellen, dass der gesamte Belastungszustand weniger unangenehm war, je weiter vorgebeugt er zunächst saß.

Diese Arbeit zeigt eindringlich, wie gefährlich es ist, Meinungen und Hypothesen als feststehende Tatsachen zu verbreiten. Gerade in diesem Fall hat es sich gezeigt, dass das vermeintlich Logische, aufgrund einer falschen Vorstellung des Ablaufes, keineswegs richtig sein muss.

Somit sollte man mit nicht bewiesenen Zusammenhängen eher zurückhaltend argumentieren.

Die FIP-Studie (forward-inclined-position) ist ebenfalls wieder als Blackbox-Studie ausgeführt worden. Wir kamen zu dem Ergebnis, dass bei kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderungen von Δv ca. 7 km/h und verschiedenen vorgebeugten Sitzpositionen keine Beschwerden und Verletzungen auftraten. Die Auswirkungen einer vornüber geneigten Position gegenüber einer Normalposition sind auch hier nicht quantitativ sondern nur qualitativ beschrieben worden. Es wurde bei dieser Untersuchung nicht festgestellt, dass in Abhängigkeit von der vornüber gebeugten Sitzposition sich die Harmlosigkeitsgrenze von der Grenze A in die Grenze B verschiebt.

Im Zusammenhang mit den FIP-Positionen, die allgemein auch als „out-of-position“ bezeichnet wird, werden auch andere besondere Sitzpositionen erwähnt, beispielsweise Körperhaltungen mit seitlich verdrehtem Kopf. Dabei ist wahrscheinlich auch der Grad der Verdrehung maßgebend. Es dürfte nicht dasselbe sein, ob ein Insasse nur in den Innenspiegel schaut oder aber, ob er sich total dreht, um nach hinten zu schauen, beispielsweise, um rückwärts zu fahren. Im Rahmen einer Doktorarbeit, die momentan an der *Akademie für Manuelle Medizin* an der Westfälischen Wilhelms-Universität *Münster* erstellt wird, wurde eine Analyse durchgeführt, bei der 52 Freiwillige verschiedenste Sitzpositionen eingenommen haben. Dabei wurde z. B. verglichen, wie weit die HWS aus der Normalposition verändert wird beim Blick in den Rückspiegel, zum Beifahrer,

in den rechten und linken Außenspiegel und zu einer über der Fahrbahn befindlichen Ampel. Aus diesen Ergebnissen zeigt sich dann, dass beim Blick in den Rückspiegel annähernd von einer normalen Sitzposition auszugehen ist. Der Blick in den Rückspiegel kann aus orthopädisch-traumatologischer Sicht sicherlich nicht als sogenannte „out-of-position“-Sitzposition beurteilt werden. Dahingegen ist die HWS beim Blick zum Beifahrer z. B. so stark aus der Normalstellung verdreht, dass aus unserer Sicht wohl von einer „out-of-position“-Sitzposition geredet werden kann. Der Effekt, den solch eine verdrehte Sitzposition auf den Betroffenen hat, ist jedoch bis zum heutigen Tage noch nicht systematisch untersucht worden. Lediglich in einer sehr umfangreichen Arbeit von *Deutscher* (1994) sind auch einige Kollisionen mit verdrehtem Kopf durchgeführt worden. Die kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderungen reichten bis zu 14,4 km/h. Bei den Schlitten-Tests nahmen 87 Versuchspersonen im Alter von 20 bis 68 Jahren teil, wobei die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung zwischen 11 und 15 km/h lag. Bei 8 Schlittentests (kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung 11 km/h) wurde der Versuch unter einer Seitendrehung des Kopfes durchgeführt. Während der Versuche konnte keine Veränderung der zuvor eingestellten Kopfposition in Bezug zur Hochachse festgestellt werden. Erste eigene Versuche scheinen diese Ergebnisse zu bestätigen. Hieraus folgt, dass eine Relativbewegung um die Hochachse (zusätzliche Drehung) auch bei Seitendrehung des Kopfes nicht erfolgt. Dieses gibt streng genommen keinen Hinweis darauf, ob nicht eine größere Verletzungsanfälligkeit besteht.

Zusammenfassend: auch wenn eine „Harmlosigkeitsgrenze“ bei der Heckkollision bzw. Frontalkollision in der Literatur beschrieben wird, darf dieses unseres Erachtens nicht dazu führen, Betroffene im Einzelfall nur noch mechanisch als „kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderungswerte“ zu betrachten. Die individuelle Begutachtung mit der individuellen Analyse vom Habitus des Betroffenen, Sitzposition, Art der Kollision etc. steht nach wie vor im Mittelpunkt. Es vermag dann aus dem oben stehenden deutlich zu werden, dass viele solche Faktoren die individuelle „Harmlosigkeitsgrenze“ eines Betroffenen beeinflussen können. Aufgrund dessen ist ein exaktes Zusammenspiel von Unfallanalytikern und Medizinern in nahezu jedem einzelnen Fall notwendig. Der Unfallanalytiker ist dabei für die Bestimmung der Belastung verantwortlich, der der Betroffene zum Zeitpunkt der Kollision ausgesetzt war; der Mediziner urteilt anschließend über die Verletzungsmöglichkeit unter Berücksichtigung dieser Belastung und der individuellen Besonderheiten. Interdisziplinär kommt man dann letztlich zum Endergebnis, unter Berücksichtigung der vielen Variablen, ob und in welchem Maß der Wahrscheinlichkeit eine Verletzung der HWS im Sinne eines sogenannten „HWS-Schleudertraumas“ aufgetreten ist.

VI. Vorausblick fürs neue Jahrtausend

Einen anderen Weg, der im allgemeinen allerdings die Möglichkeiten eines Unfallanalytikers bei weitem übersteigt, wird seit jüngster Zeit vor allem durch schwedische und österreichische Forscherteams beschritten. Seit Beginn der 90-er Jahre werden neue Methoden zur Quantifizierung von Halswirbelsäulenbelastungen erarbeitet, z. B. *Eichberger et al.* (1998), *Bostrom et al.* (1999). Die zur Zeit herrschende Meinung bezüglich der Entstehung von HWS-Beschwerden ergab sich aus der versuchsmäßigen Ermittlung von Druckwellen innerhalb der Blutgefäße bzw. der Rückenmarkslüssigkeit während der Kopfbewegung nach hinten. Dieses wurde bei Versuchen mit anästhesierten Schweinen festgestellt. Es heißt, dass solche Druckunterschiede die Membrane von Nervengewebe (Ganglien im Bereich der Nervenaustritte aus dem Rückenmark) schädigen könnten. Es wird die Hypothese aufgestellt, dass

dieses bei Menschen zu Beschwerden führen könnte. Man stellte fest, zu welchem Zeitpunkt der Kopfbewegung die größten Druckgradienten auftraten und man versuchte, diese theoretisch zu beschreiben. Es ergab sich eine Formel für den sog. NIC-Index (NIC = Neck Injury Criterion). Es hat sich dann, vorerst lediglich für Schweine gültig, ein Grenzwert von

$$\text{NIC} = 15 \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}$$

ergeben.

Es wird postuliert, dass nach diversen mathematischen Modellierungen und nach Durchführung von Leichenversuchen dieser NIC auch für Menschen gelten könnte. *Walz* (1998) beschreibt, dass bei Veränderung der Konstellationen in den Versuchen, die nach bisherigen Erkenntnissen die Verletzungsschwere verringern, sich ein niedrigerer Wert des NIC ergab. Um diesen Wert zu erzeugen, wird ein spezieller Hybrid-3-Dummy mit einer speziellen Halskonstruktion verwendet. Man misst die Beschleunigungsdifferenz zwischen Kopf und oberstem Brustwirbel.

Die Fahrzeugindustrie benutzt diesen NIC-Index als Hilfsgröße zur Entwicklung von besseren Sitzen unter Variation verschiedener Randbedingungen.

Nach einem Unfallgeschehen kann ein individueller NIC-Index nicht berechnet werden, da die tatsächlichen Beschleunigungen der einzelnen Teile der Halswirbelsäule des Geschädigten nicht bekannt sind.

Weist der Geschädigte eine direkt vergleichbare Größe und ein direkt vergleichbares Gewicht, wie ein zur Verfügung stehender Dummy auf, so kann der Unfall mit den angegebenen Nebenbedingungen nachgefahren werden. Der NIC-Wert kann über derartige Versuche bestimmt werden. Mit Sicherheit werden die genannten Einflüsse wie Sitzkonstruktion, Sitzposition und dergleichen durch den NIC-Wert dann erfasst. Z. Zt. stellt sich allerdings die praktische Frage, wie ein NIC-Wert schließlich zu bewerten ist.

Nach *Walz* (1998) wurde festgestellt, dass auch bei großen Variationen von Probanden bislang Kollisionen mit einem Δv von 10 km/h der NIC praktisch immer unterhalb des heute vorgeschlagenen Grenzwertes von 15 lag, dieses auch bei simulierten Muskelreaktionen, verschiedenen Beschleunigungswerten des Fahrzeugs und unterschiedlich steifen Sitzstrukturen und variierten Kopfbeschleunigungen.

Beim NIC handelt es sich um eine von Biomechanikern eingeführte Größe, die zur Beurteilung von HWS-Verletzungen dienen soll. Hier wird die Relativbewegung zwischen Kopf und Oberkörper als Kriterium herangezogen. Betrachtet man die internationale Literatur, wie den Tagungsband des Weltkongresses zum „HWS-Schleudertrauma“ in Kanada 1999, so ist ersichtlich, dass man sich intensiv mit dieser Thematik beschäftigt. Da es sich jedoch um eine sehr neue Größe handelt, ist die Berechnung dieser Größe und Interpretation z. Zt. einem laufenden Wandel unterlegen. Für die tägliche Arbeit eines Unfallanalytikers zur Vorbereitung von Gerichtsgutachten hat diese Betrachtungsweise z. Zt. mit Sicherheit keine Relevanz. Es sollte jedoch darauf hingewiesen werden, dass gerade mit Hilfe einer derartigen Betrachtungsweise die gesamten Einflüsse erfasst würden.

Eine Auswertung der Beschleunigungsdaten, die in der Studie *Castro et al.* (1997) bezogen auf die Kopf- und Halsbeschleunigung ermittelt wurden, ergab erste Hinweise darauf, dass die Personen, bei denen Beschwerden vorlagen, einen deutlich höheren NIC-Index aufwiesen als die Personen, bei denen keine Beschwerden vorhanden waren.

Möglicherweise kommen wir eines Tages zu dem Ergebnis, dass für bestimmte Fallgestaltungen, gebildet aus horizontalem Abstand zwischen Kopf und Kopfstütze, Kollisionsdauer, mitt-

lere Fahrzeugbeschleunigung, Elastizität und Schrägstellung der Lehne, Körpergröße, Sitzposition und Erwartungshaltung Abhängigkeiten zu einem NIC-Wert vorhanden sind, mit gleichzeitig besseren Kenntnissen darüber, ab welchem NIC-Index leichte Beschwerden bzw. Verletzungen der Halswirbelsäule zu erwarten sind.

Der heute tätige Sachverständige kann sich selbstverständlich nicht darauf zurückziehen, dass er möglicherweise in 10 oder 20 Jahren andere Möglichkeiten zur Verfügung haben könnte. Er muss mit dem zum jetzigen Zeitpunkt vorhandenen Kenntnisstand seine Beurteilung nach bestem Wissen und Gewissen abgeben.

Literatur

Becke, M.; Castro, W.H.M.; Von Aswegen, A.; Meyer, St.: Zur Belastung von Fahrzeuginsassen bei leichten Seitenkollision, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik (1999) 11: 293–298

Becke, M.; Castro, W.H.M.: Zur Belastung von Fahrzeuginsassen bei leichten Seitenkollisionen, Teil II, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik (2000; im Druck)

Becke, M.: Grundlagen der verkehrstechnischen Begutachtung. In: Castro, W.H.M., Kügelgen, B., Ludolph, E.; Schröter, F. (Hrsg.): Das „Schleudertrauma“ der Halswirbelsäule, Enke-Verlag 1998

Böström, O.; Fredriksson, R.; Haland, Y.; Jakobsson, L.; Krafft, M.; Lövsund, P.; Muser, M.H.; Svensson, M.: Comparison of car seats in low speed rear-end impacts using the biorid dummy and the new Neck Injury Criterion (NIC), Weltkongress „whiplash associated disorders“, Canada, 7. bis 11. Februar 1999

Brault, Jr.; Wheeler, Jb.; Siegmund, Gp.; Brault, Ej.: Clinical response of human subjects to rear-end automobile collisions, Arch Phys Med Rehabil (1998) 79:72–80

Castro, W.H.M.; Meyer, St.; Becke, M.; Nentwig, Ch.; Hein, M.; Ercan, B.; Homann, St.; Wessels, U.; Du Chesne, A.: No stress – no „whiplash“? Vortrag während Jahrestagung Spine Society of Europe, 11. 9. 1999 München

Castro, W.H.M.; Schilgen, M.; Meyer, S.; Weber, M.; Peucker, C.; Wörtler, K.: Do „whiplash injuries“ occur low-speed rear impacts? Eur Spine J (1997) 6:366–375

Deutscher, C.: Bewegungsablauf von Fahrzeuginsassen beim Heckaufprall. Eurotax (International) AG, CH-8807 Freienbach, 1994

Eichberger, A.; Steffan, H.; Geigl, B.; Svensson, M.; Böström, O.; Leinzinger, P.E.; Darok, M.: evaluation of the acclibility of the Neck Injury Criteria (NIC) in rear-end impacts on the basis of human subjects tests, Irobi Conference – Göteborg, September 1998

Ewak, : Versuche zur Belastung der HWS bei kleinen Seitenanstoßen, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik, (1997) 2: 328–332

Hell, W.; Langwieder, K.; Walz, F.: Occurrence of Reported Cervical Spine Injuries in Car Accidents and Improved Safety Standards for Rear-End-Impacts Vertragsmanuskript vom Weltkongress zum Thema „HWS-Beschwerden“ in Vancouver, Canada 1999

Kalthoff, W.: Beschreibung des teilelastischen Kollisionscharakters von Pkw-Front-Heck Kollisionen mit Hilfe der experimentell ermittelten Stoßzahl. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik (2000; im Druck)

Kuhn, P.: HWS-Verletzung in der Schadenregulierung, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik (1998) 10: 268–269

Kullgren, A.; Krafft, M.; Nygren, A.; Tingwall, C.: AIS, Neck Injuries in frontal impacts; Influence of crash pulse characteristics on Injury Risk, Weltkongress „whiplash associated disorders“, Canada, 7. bis 11. Februar 1999

Lemcke, H.: „Beweisanforderungen im Haftpflichtverfahren aus der Sicht des Richters“. In: Castro, W.H.M., Kügelgen, B., Ludolph, E., Schröter, F. (Hrsg.): Das „Schleudertrauma“ der Halswirbelsäule, Enke-Verlag 1998

Löhle, U.: HWS-Problematik, zfs 1997 (Zeitschrift für Schadenrecht) und Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik (1998) 6: 159–163

Ludolph, E.: Einführung in das Problem „Das Schleudertrauma der Halswirbelsäule“. In: Castro, W.H.M.; Kügelgen, B., Ludolph, E.; Schröter, F. (Hrsg.) Das „Schleudertrauma“ der Halswirbelsäule, Enke-Verlag 1998

Meyer, St.: Zur Belastung der Halswirbelsäule bei Lkw-Pkw-Auffahrkollisionen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik (1996) 11: 315–320

Meyer, St.; Becke, M.; Kalthoff, W.; Castro, W.H.M.: FIP – Forward Inclined Position, Insassenbelastung infolge vorgebeugter Sitzpositionen bei leichten Heckkollisionen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik (1999) 7/8: 213–218

Meyer, St.; Weber, M.; Kalthoff, W.; Schilgen, M.; Castro, W.H.M.: Freiwilligen-Versuche zur Belastung der Halswirbelsäule durch Pkw-Heck-Anstöße. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik (1999) 1: 13–24

Münker, H.; Langwieder, K.; Cher, E.; Hell, W.: HWS-Beschleunigungsverletzungen – Eine Analyse von 15 000 Pkw-Pkw-Kollisionen. In: Kügelgen, B. (Hrsg.) Neuroorthopädie 6. Springer Verlag Berlin Heidelberg 1995

Otte, D.; Pohlemann, T.; Blauth, M.: HWS-Distorsionen im geringen Unfallschwerebereich, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik (1998) 1: 15–21

Schmidt, G.: Zur Biomechanik des Schleudertraumas der Halswirbelsäule, Versicherungsmedizin (1989) 4: 121–126

Schröter, F.: Grundlagen der traumatologischen Begutachtung – was braucht man an Informationen? In: Castro, W.H.M., Kügelgen, B., Ludolph, E., Schröter, F. (Hrsg.): Das „Schleudertrauma“ der Halswirbelsäule, Enke-Verlag 1998

Schuller, E.; Eisenmenger, W.: Die Verletzungsmechanische Begutachtung des HWS-Schleudertraumas. Unfall- und Sicherheitsforschung (1993) 89: 193–196

Stephan, C.: Experimentelle Untersuchung der Bewegungskinetik und der Belastung von Fahrzeuginsassen bei vorgebeugter Sitzposition im Hinblick auf HWS-Verletzungen bei leichten Heckkollisionen. Diplomarbeit am Institut für Kraftfahrwesen, Universität Hannover 1998

Szabo, T.J.; Welcher, J.B.: Human subject kinematics and electromyographic activity during low speed rear impacts. SAE Paper 962432 (1996)

Walz, F.: Die Bedeutung des NIC (Neck Injury Criterion) bei Heckkollisionen, persönliche Mitteilung, 26. 9. 1998, Zürich

Winnighoff, M.; Walter, B.; Becke, M.: Gurtschlitten – Untersuchung der biomechanischen Belastung, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik (2000) 2, S. 45–48.

Wittenberg, R.H.; Shea, M.; Edwards, T.; White, A.A.; Hayes, W.C.: In-vitro-Hyperextensionsverletzungen der Halswirbelsäule. Vortrag 46. Jahrestagung der Vereinigung Süddeutscher Orthopäden e. V., Baden-Baden, 1998