

Stefan Meyer*, Michael Weber**, Wolfram Kalthoff***, Markus Schilgen****, William Castro*****

Freiwilligen-Versuche zur Belastung der Halswirbelsäule durch Pkw-Heckanstöße

Zusammenfassung

Im Rahmen einer interdisziplinären (technisch-medizinischen) Studie des Ingenieurbüros Schimmelpfennig+Becke und der Akademie für Manuelle Medizin an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster wurden Pkw-Auffahrkollisionen mit resultierenden Geschwindigkeitsänderungen zwischen 10 und 15 km/h im Hinblick auf Verletzungen der Halswirbelsäule untersucht. Dabei wurde der Bewegungsablauf der Insassen erfaßt und es wurden Analogien zwischen Pkw-Auffahrkollisionen und Autoskooter-Anstößen nachgewiesen.

An den 17 Pkw- und 3 Autoskooter-Kollisionen nahmen 14 männliche Freiwillige im Alter von 28 bis 47 Jahren und 5 weibliche Freiwillige im Alter von 26 bis 37 Jahren teil. Vor und nach jedem Crash wurden die Freiwilligen klinisch und kernspintomographisch untersucht. Zusätzlich wurde eine Ultraschall-Untersuchung der HWS-Beweglichkeit durchgeführt. Während des Crash-Tests waren alle Versuchspersonen akustisch und visuell von der Außenwelt abgeschirmt, um eine Antizipation des Anstoßereignisses zu unterbinden. Der Tonus der Halsmuskulatur wurde durch Elektromyographie-Oberflächen-Elektroden in verschiedenen Bereichen überwacht. Der Bewegungsablauf und die biomechanischen Beschleunigungssignale wurden computerunterstützt aufgezeichnet. In allen Versuchsfahrzeugen war zusätzlich ein Unfalldatenspeicher installiert.

Es wurden Geschwindigkeitsänderungen von 8,7 bis 14,2 km/h bei den Pkw und 8,3 bis 10,6 km/h bei den Autoskootern realisiert. Die mittleren Beschleunigungen lagen zwischen 2,1 und 3,6 g bei den Pkw und 1,8 bis 2,6 g bei den Autoskootern. Weder bei den orthopädischen Untersuchungen, der computerunterstützten Überprüfung der Beweglichkeit, noch den kernspintomographischen Untersuchungen wurden Verletzungen der Freiwilligen festgestellt. Nur ein männlicher Proband gab nach den Versuchen über einen längeren Zeitraum von 10 Wochen eine Einschränkung der Linksrotation an. Keiner der Probanden berichtete über gravierende Beschwerden. Die kollisionsdynamischen Ausgangsparameter zur Ermittlung der biomechanischen Insassenbelastung bei Autoskooter- und Pkw-Kollisionen lagen bei leichten bis mäßigen Verformungen der Pkw in gleicher Größenordnung und zeigten einen weitgehend identischen Verlauf.

Allgemein konnte durch die Versuche bestätigt werden, daß die sich bei Geschwindigkeitsänderungen von bis zu 10 km/h ergebenden biomechanischen Insassenbelastungen problemlos ohne Verletzungsfolge von der Halswirbelsäule toleriert werden. Für die Praxis der technischen Analyse sind die bei den Versuchen erzeugten Beschädigungsbilder der Fahrzeuge eine wesentliche Arbeitsgrundlage.

Summary

A study was conducted to find out whether in a rear-impact motor vehicle accident, velocity changes in the impact vehicle of between 10 and 15 km/h can cause so-called »whiplash injuries«. An assessment of the actual injury mechanism of such whiplash injuries and comparison of vehicle rear-end collisions with amusement park bumper car collisions was also carried out. The study was based on experimental biochemical, kinematic and clinical analysis with volunteers.

Fourteen male volunteers (aged 28 - 47 years; average 33.2 years) and five female volunteers (aged 26 - 37 years; average 32.8 years) participated in 17 vehicle rear-end collisions and 3 bumper car collisions. Before, 1 day after and 4 - 5 weeks after each vehicle crash test and in two of the three bumper car crash tests a clinical examination, a computerized motion analysis, and an MRI examination of the cervical spine of the test persons were performed. During each crash test, in which the test persons were completely screened-off visually and acoustically, the muscle tension of various neck muscles was recorded by surface electromyography (EMG). The kinematic responses of the test persons and the forces occurring were measured. To record the acceleration effects of the target vehicle and the bullet vehicle, vehicle accident data recorders were installed in both. The results showed that the range of velocity change (vehicle collisions) was 8.7 - 14.2 km/h (average 11.4 km/h) and the range of mean acceleration of the target vehicle was 2.1 - 3.6 g (average 2.7 g). The range of velocity change (bumper car collisions) was 8.3 - 10.6 km/h (average 9.9 km/h) and the range of mean acceleration of the target bumper car was 1.8 - 2.6 g (average 2.2 g). No injury signs were found at the physical examinations, computerized motion analyses, or at the MRI examinations. Only one of the male volunteers suffered a reduction of rotation of the cervical spine to the left of 10° for 10 weeks. The stresses recorded in the vehicle collisions were in the same range as those recorded in the bumper car crashes. From the extent of the damage to the vehicle after a collision it is possible to determine the level of the velocity change. The study concluded that, the »limit of harmlessness« for stresses arising from rear-end impacts with regard to the velocity changes lies between 10 and 15 km/h. For everyday practice, photographs of the damaged two cars involved in a rear-end impact are essential to determine this velocity change.

*Dipl.-Ing. Stefan Meyer,

**Dipl.-Ing. Michael Weber,

***Dipl.-Ing. Wolfram Kalthoff, c/o Ingenieurbüro Schimmelpfennig + Becke, Münsterstraße 101, 48155 Münster-Wolbeck,

****Dr. med. Markus Schilgen, Leitender Arzt der Akademie für Manuelle Medizin an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, Von-Esmarch-Straße 56, 48149 Münster,

*****Priv.-Doz. Dr. med. William Castro, Leitender Arzt der Akademie für Manuelle Medizin an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster, Von-Esmarch-Straße 56, 48149 Münster

1 Einführung

In den letzten Jahrzehnten wurde die passive Sicherheit des Automobils stark verbessert. Dies gelang auf der Grundlage einer intensiven Erforschung der Insassenbewegungen und hieraus ableitbarer biomechanischer Belastungswerte im Rahmen vieler Frontalaufprallversuche auf vergleichsweise hohem Geschwindigkeitsniveau. Zur Zeit bilden Seitenaufprallversuche und die hieraus ableitbaren Komponenten zur Erhöhung der passiven Sicherheit (Seitenaufprallschutz, Seitenairbags, etc.) ein Forschungsschwerpunkt.

Obwohl die Unfallschwere von Pkw-Auffahrkollisionen im Vergleich zum Frontal- und Seiten-Crashtest aufgrund des geringen Relativgeschwindigkeitsniveaus und den hieraus resultierenden Insassenbelastungen in der Vergangenheit nur von untergeordneter Bedeutung waren, haben sie (auch im Bereich der Unfallforschung) aufgrund ihrer Häufigkeit und den daraus erwachsenen hohen volkswirtschaftlichen Kosten zunehmend an Bedeutung gewonnen.

Statistisch läßt sich nachweisen, daß die Zahl und Schwere der sogenannten Schleudertraumen trotz der verbesserten passiven Sicherheit gerade bei leichten bis mäßigen Beschädigungen der Fahrzeuge paradoxerweise stetig zunimmt. Um diesem Trend entgegenzuwirken, wird von den Versicherungen nicht mehr vorbehaltlos gezahlt, sondern insbesondere bei geringen Fahrzeugbeschädigungen bestritten, daß ein kausaler Zusammenhang zwischen Unfall und beklagter Verletzung bestehen kann. Diese Streitfrage läßt sich in der Regel nur durch Beauftragung eines Unfallanalytikers oder Biomechanikers klären. Um die hierzu erforderlichen Grundlagen erst einmal zu schaffen, beschäftigt sich das Ingenieurbüro Schimmelpfennig+Becke seit nunmehr 5 Jahren intensiv mit der Realsimulation von Pkw-Pkw-Auffahrkollisionen. So wurde beispielsweise im Jahre 1993 im Rahmen einer rein technischen Untersuchung der Zusammenhang zwischen Kollisionsparametern und der Bewegungskinetik von Probanden infolge eines Heckaufpralls experimentell untersucht [9, 10]. Diese Arbeit wird im weiteren kurz Studie 93 genannt.

In dieser Studie wurden erstmals genaue Messungen der Anstoßschwere und -häufigkeit in einem Autoskooter-Fahrgeschäft und anschließend 14 Pkw-Pkw-Heckkollisionen mit Probanden durchgeführt. Aus den Versuchen wurde abgeleitet, daß die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung Δv_z ein geeigneter technischer Kollisionsparameter zur Beschreibung der biomechanischen Insassenbelastung ist. Es wurden Geschwindigkeitsänderungen von 6 bis 13 km/h erzielt. Da bei diesen Belastungshöhen keiner der beiden beteiligten Probanden Beschwerden äußerte und die gemessenen Beschleunigungswerte teilweise deutlich unter Autoskooter-Niveau lagen, wurde seinerzeit postuliert, daß aus technischer Sicht eine Verletzungsentstehung an der Halswirbelsäule bei Geschwindigkeitsänderungen bis 10 km/h sehr unwahrscheinlich ist.

Von 1994 bis heute sind zahlreiche Veröffentlichungen zur HWS-Problematik erschienen. Viele dieser Arbeiten sind von technischer Seite durch deutlich von der Realität abweichende Anstoßbedingungen und von medizinischer Seite durch unterschiedliche Hypothesen zum Verletzungsmechanismus gekennzeichnet. Es wurden u.a. neue Kopfstützenkonstruktionen aufgrund von Laborversuchen mit für den Heckaufprall nicht validierten Dummies entwickelt, deren Schutzwirkung mehr als fraglich ist. Ein überzeugender Nachweis für den tatsächlichen Verletzungsmechanismus an der Halswirbelsäule hat keine dieser Untersuchungen geliefert.

Aufbauend auf der Studie wurde im Herbst 96 und Frühjahr 97 im Rahmen einer interdisziplinären Zusammenarbeit des Ingenieurbüros Schimmelpfennig+Becke mit der Akademie für Manuelle Medizin an der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster eine breit angelegte experimentelle Untersuchung durchgeführt. Im Rahmen dieser Studie (im folgenden kurz Studie 97 genannt) wurden 17 Pkw-Pkw-Heckanstöße und 3 Autoskooter-Autoskooter-Heckanstöße mit insgesamt 19 Freiwilligen gefahren. Hierbei ging es im wesentlichen um die Beantwortung der Frage, ob klinische und kernspintomographische Veränderungen im Bereich der Halswirbelsäule nach einem Pkw-Heckanstoß in einem Bereich der Geschwindigkeitsänderung von 10 bis 15 km/h nachweisbar sind. Zusätzlich sollte der exakte Bewegungsablauf des Insassen-

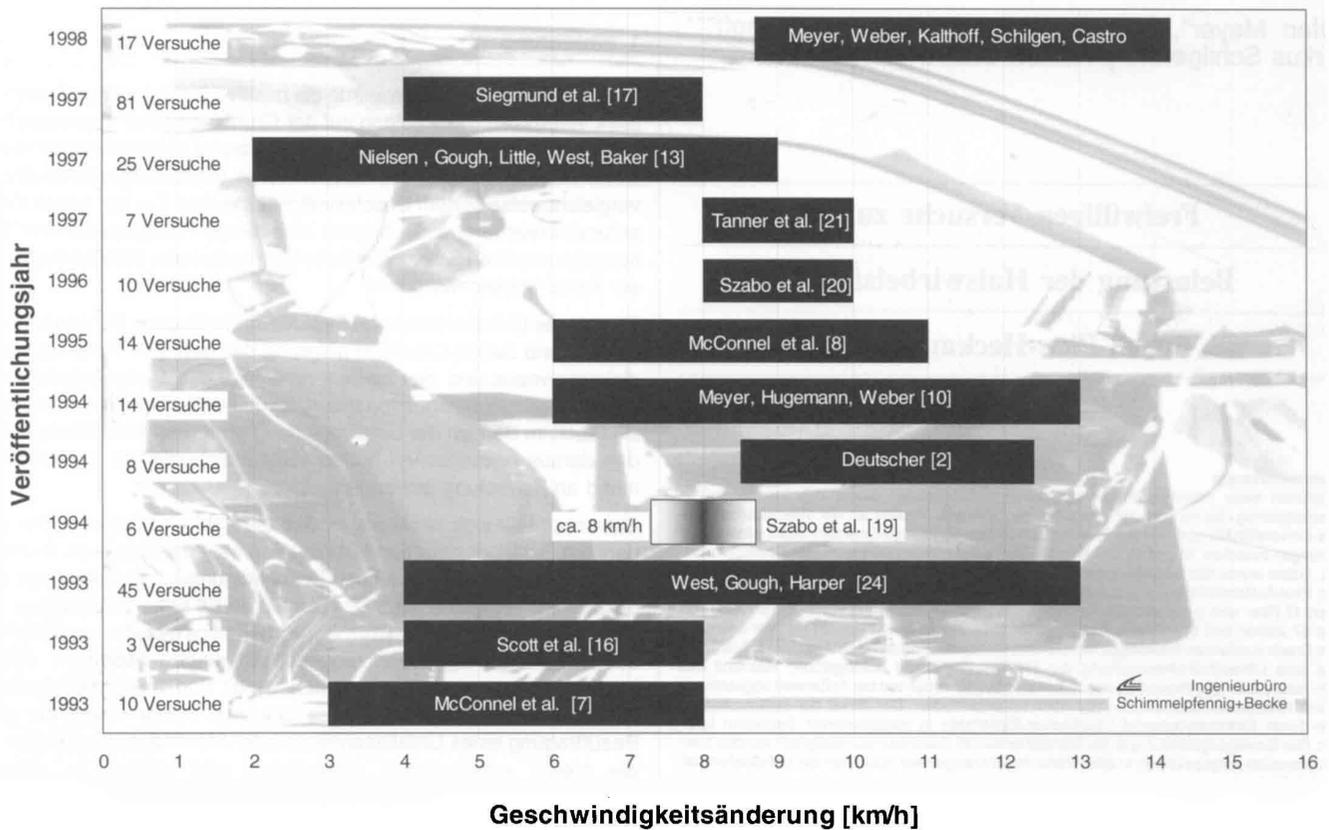


Bild 1 Auswahl veröffentlichter Studien
Fig. 1 Extraction of published studies

körpers beim Heckaufprall aufgezeichnet werden, um somit Rückschlüsse auf den Verletzungsmechanismus ziehen zu können. Durch genaue Messungen bei Autoskooter-Anstößen wurde untersucht, ob die Ausgangsdaten der biomechanischen Belastung mit denen der Pkw-Kollision vergleichbar sind. Schließlich wurden zahlreiche Beschädigungsbilder realer Auffahrkollisionen erzeugt, die es dem forensisch tätigen Unfallanalytiker ermöglichen, retrospektiv auf Grundlage der dokumentierten Fahrzeugbeschädigungen die Insassenbelastung einzugrenzen. Finanziell unterstützt wurde diese sehr kostenintensive Studie ausschließlich durch die Bertelsmann-Stiftung, ein Sponsoring durch Versicherungen oder andere Interessengruppen fand nicht statt.

Aufgrund der interdisziplinären Ausrichtung der Studie 97 wurde im Rahmen dieser Ausarbeitung ein Schwerpunkt auf die praktische Anwendbarkeit der Ergebnisse durch den forensisch tätigen Unfallsachverständigen gelegt. Die Studie fand insbesondere in medizinischer Fachwelt große Beachtung und wurde mit dem europäischen Preis für Wirbelsäulenforschung, dem AcroMed-Preis 1997 der European Spine Society ausgezeichnet [3].

2 International durchgeführte Freiwilligen-Versuche

In den vergangenen 5 Jahren sind eine Vielzahl von Arbeiten in der internationalen Literatur erschienen, die sich mit der aus einem Heckanstoß resultierenden Insassenbewegung beschäftigen. Bild 1 zeigt eine Auswahl von Fahrzeug-Heckkollisionsversuchen unter Beteiligung Freiwilliger. Hierin wurde der Bereich der Geschwindigkeitsänderung des angestoßenen Fahrzeugs Δv_2 , die Anzahl der durchgeführten Versuche und das Jahr der Veröffentlichung aufgetragen. Allen Veröffentlichungen ist gemeinsam, daß zur Bewertung der Unfallschwere, die Geschwindigkeitsänderung angegeben wurde. Diese Entwicklung zeigt, daß der Kollisionsparameter Δv_2 zur einfachen Beschreibung der aus einem Heckanstoß resultierenden biomechanischen Insassenbelastung als international anerkannt gilt. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und um die Ergebnisse der eigenen Studie 93 besser einordnen zu können, wurde bei der hier getroffenen Auswahl auf die Auflistung in großer Anzahl vorhandener Laborversuche (Schlittentests) verzichtet. Diese

sind jedoch aus unseren früheren Literaturrecherchen [11, 12] bereits bekannt. Unsere auf äußerst umfangreichen Recherchen basierende Arbeit wurde in den letzten Jahren in mehreren Publikationen abgeschrieben und bedauerlicherweise ohne Quellenbezeichnung veröffentlicht.

Summiert man alle Versuche aus den hier zitierten Literaturstellen auf, so gelangt man auf eine Anzahl von insgesamt 240 Versuchen unter Beteiligung Freiwilliger im heckseitig angestoßenen Versuchs-Fahrzeug. Hierbei wurden Geschwindigkeitsänderungen in einem Bereich von 2 bis 13 km/h gemessen, ohne daß im Anschluß daran bei den Freiwilligen objektivierbare Verletzungen oder länger andauernde Beschwerden aufgetreten sind.

Hervorzuheben ist die Arbeit von Szabo und Welcher [20]. Aufgrund einer eigenen Literaturrecherche (242 Belastungstests) kommen die Autoren in dieser Arbeit zu dem Ergebnis, daß kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderungen von bis zu 9 km/h nicht geeignet seien, signifikante Verletzungen an der Halswirbelsäule hervorzurufen.

3 Untersuchungsansatz

Aufbauend auf den Ergebnissen der Studie 93 wurden im Rahmen der Studie 97 Pkw-Heckkollisionen und Skooter-Kollisionen durchgeführt, bei denen im Gegensatz zur 93er Studie jeweils beide Skooter mit Meßtechnik ausgestattet waren.

Insgesamt standen 19 Versuchsfahrzeuge (6 VW Golf II, 5 Opel Kadett E Caravan, 5 Opel Rekord E 2, und jeweils ein DB 124, DB 124 T-Modell und Opel Kadett E Stufenheck) zur Verfügung.

Bei der Auswahl der Versuchsfahrzeuge wurde darauf geachtet, daß das Kollisionsverhalten verschiedener Fahrzeugkonzepte (Stufenheck, Fließheck und Kombi) Berücksichtigung fand. Der strukturversteifende Einfluß einer Anhängerkupplung wurde mit zwei identischen Versuchsfahrzeugen vom Typ Opel Rekord E 2 analysiert.

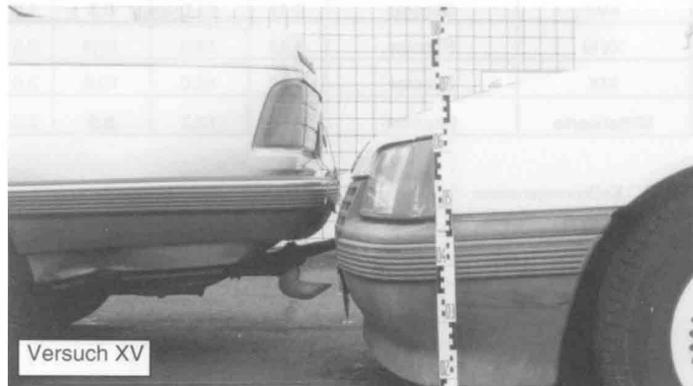
Angesichts der Tatsache, daß im alltäglichen Straßenverkehr bei Heckkollisionen das auffahrende Fahrzeug fast immer »gebremst« auffährt,



Versuch XV

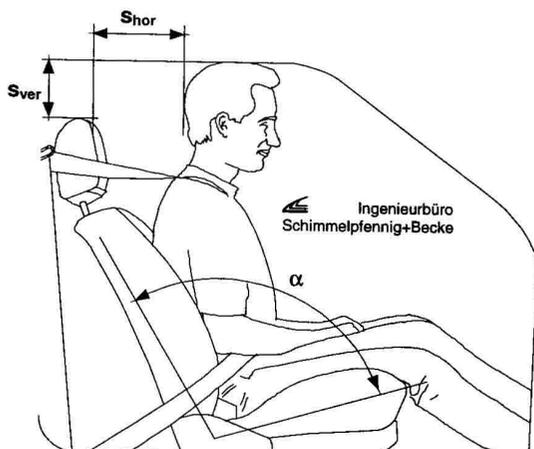


Versuch XV



Versuch XV

Bild 2 Unbeschädigte Versuchsfahrzeuge und Anstoßkonfiguration
Fig. 2 Undamaged crash test vehicles and impact configuration



Sver = 2-17 cm Mittelwert: 6,4 cm
Shor = 4-11 cm Mittelwert: 6,5 cm
 α = 91-110° Mittelwert: 97°

Bild 3 Ausgangsposition
Fig. 3 Initial position

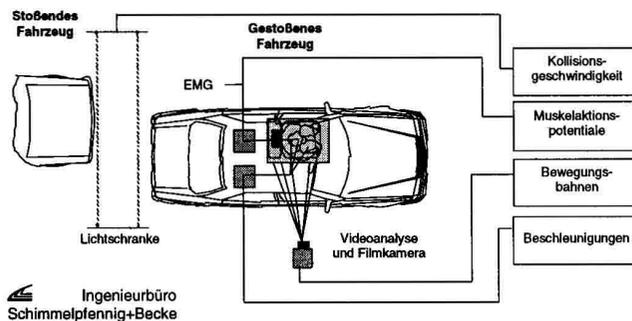


Bild 4 Versuchsaufbau
Fig. 4 Experimental setup

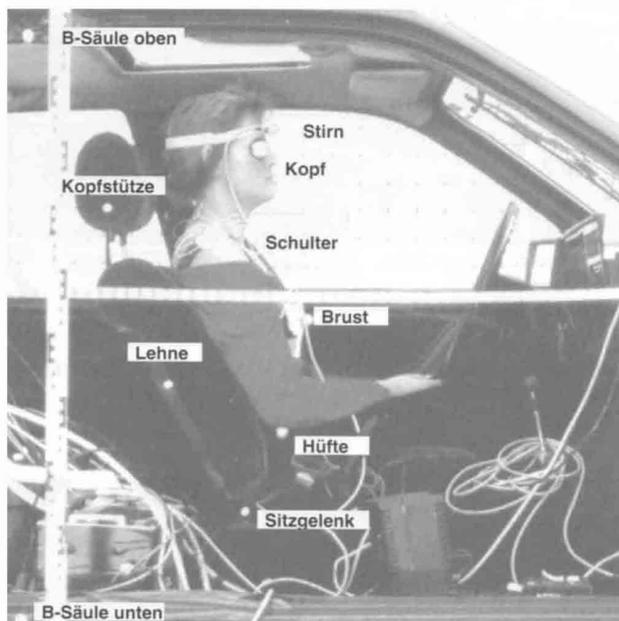


Bild 5 Markerpositionen
Fig. 5 Positions of markers

wurde ein wesentlicher Teil der auffahrenden Versuchsfahrzeuge während des jeweiligen Crashes im vorderen Bereich abgesenkt.

Insgesamt erklärten sich 19 Testpersonen nach einer ausführlichen Aufklärung über die Details der Studie (incl. eventueller Risiken) bereit, freiwillig teilzunehmen. Es standen 14 Männer im Alter von 28 bis 47 und 5 Frauen im Alter von 26 und 37 Jahren für die 17 Pkw- und 3 Autoskooter-Kollisionen zur Verfügung¹. Oberstes Gebot bei den Versuchen war die Sicherheit der Probanden. Deshalb wurden alle Kollisionsgeschwindigkeiten zuvor so berechnet, daß keine höheren Belastungswerte als bei Autoskooter-Anstößen auftreten konnten.

Folgende Ziele der technisch-medizinischen Studie wurden formuliert:

- Erzeugung praxistauglicher Beschädigungsbilder als Grundlage der retrospektiven Unfallanalyse mit Angabe der technischen Kollisionsparameter (Geschwindigkeitsänderung, EES-Wert, Stoßdauer, mittlere Beschleunigung).
- Vergleich der technischen Kollisionsparameter einer Autoskooter-Kollision mit denen realer Pkw-Auffahrkollisionen.
- Ermittlung des Einflusses der Stoßdauer und des Bremszustandes des gestoßenen Pkw auf die Insassenbelastung.
- Detaillierte Bewegungsanalyse der Freiwilligen im Hinblick auf neue Erkenntnisse zum Verletzungsmechanismus an der Halswirbelsäule.

In die Studie 97 waren zwei Diplom-Arbeiten [1, 5] integriert, die von der Fachhochschule Osnabrück in Zusammenarbeit mit dem Ingenieurbüro Schimmelpfennig+Becke durchgeführt wurden.



Bild 6 Beschädigungsbilder Versuchsfahrzeuge ($v_1 = 25 \text{ km/h}$, $\Delta v_2 = 11 \text{ km/h}$)
Fig. 6 Damages of crash test vehicles ($v_1 = 25 \text{ km/h}$, $\Delta v_2 = 11 \text{ km/h}$)



Bild 7 Versuchsaufbau Autoskooter-Versuch
Fig. 7 Experimental setup of bumper car crash tests

4 Versuchsablauf

Begonnen wurde die Testreihe mit einer medizinischen Voruntersuchung (1 bis 6 Tage vor dem Crash). Diese umfaßte eine orthopädisch-manualmedizinische Untersuchung der HWS (incl. einer Überprüfung der groben Kraft, der Sensibilität und der Reflexe der oberen Extremitäten) und eine computergesteuerte Ultraschall-Untersuchung der HWS-Beweglichkeit mit dem CMS-50-Gerät der Firma Zebis. Neben der Ante- und Retroflexion, Rotation in Neutralstellung des Kopfes und Seitenneigung wurde auch die Rotation in maximaler Deflexion und maximaler Retroflexion gemessen. Zusätzlich wurde eine kernspintomographische Untersuchung der HWS mit diversen Sequenzen unter Zugabe von Kontrastmittel durchgeführt.

Versuch	Meßfahrzeug (gestoßen)	T [s]	v_1 [km/h]	Δv_2 [km/h]	a_{2m} [g]
I	Kadett	0,12	17,5	8,7	2,1
II	Kadett	0,11	21,0	13,6	3,6
III	Kadett	0,11	18,5	9,0	2,4
IV	Kadett	0,11	18,5	9,4	2,5
V	Kadett	0,11	19,5	11,4	3,0
VI	Golf	0,13	20,5	12,8	2,7
VII	Golf	0,13	19,0	12,7	2,8
VIII	Golf	0,12	22,5	14,2	3,4
IX	Golf	0,14	20,0	12,7	2,6
X	Golf	0,13	22,0	13,3	2,9
XI	Rekord	0,12	25,0	12,6	3,0
XII	Rekord	0,12	20,5	9,5	2,2
XIII	Rekord	0,12	21,0	9,7	2,3
XIV	Rekord	0,11	19,5	9,3	2,4
XV	Rekord	0,11	25,0	11,0	3,0
XVI	DB W124 T	0,17	27,5	13,3	2,2
XX	Kadett	0,12	18,0	9,8	2,3
Mittelwerte	Pkw	0,12	20,9	11,4	2,7

XVII	Skooter	0,13	11,0	8,3	1,8
XVIII	Skooter	0,12	13,5	10,8	2,5
XIX	Skooter	0,12	12,0	10,6	2,6
Mittelwerte	Skooter	0,12	12,2	9,9	2,3

Bild 8 Kollisionsparameter
Fig. 8 Parameters of collision

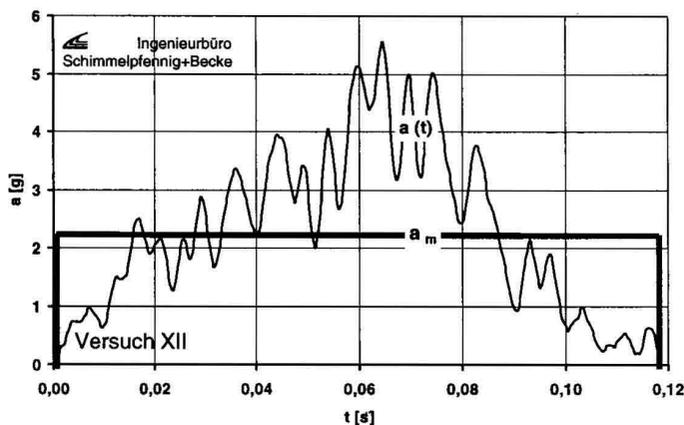


Bild 9 Beschleunigungsverlauf und mittlere Beschleunigung
Fig. 9 Acceleration and mean acceleration

Im Anschluß an diese Untersuchungen fanden auf der Crash-Anlage des Ingenieurbüros Schimmelpfennig+Becke die Versuche statt. Unmittelbar vor den Versuchen wurden die Fahrzeuge in unbeschädigtem Zustand und die angestrebte Anstoßkonstellation fotografisch dokumentiert (Bild 2). Die Sitzposition der Freiwilligen im Fahrzeug wurde vermessen. Bild 3 zeigt die Bandbreite und den Mittelwert der Ausgangssitzpositionen. Der horizontale Abstands_{hor} zwischen Hinterkopf und Kopfstütze (bis 17 cm), der vertikale Abstand_{ver} zwischen Kopfstützenoberkante und Kopfoberkante (bis 11 cm) und der Neigungswinkel α zwischen Sitzfläche und Rückenlehne (bis 110°) wichen häufig stark von der optimalen Einstellung ab. Die in den Versuchsfahrzeugen einge-



Bild 10 Vergleich der Beschädigungsbilder der Versuchsfahrzeuge bei unterschiedlichen Überdeckungsgraden

Fig. 10 Comparison of vehicle damages with different degrees of overlap

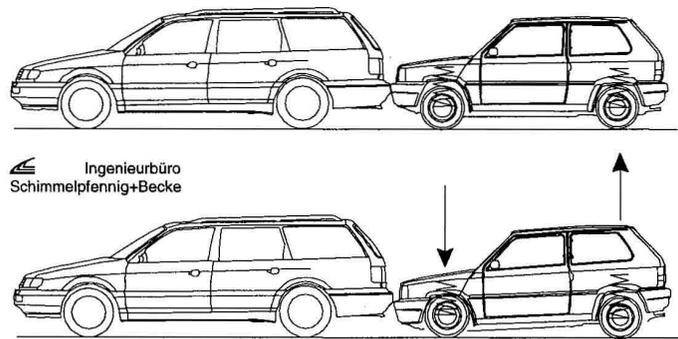


Bild 11 Höhenzuordnung in Abhängigkeit des Bremszustandes
Fig. 11 Vertical offset dependent on brake conditions



Bild 12 Beschädigungsbilder der Versuchsfahrzeuge (»Stoßfänger-auf-Stoßfänger-Anprall«)
Fig. 12 Vehicle damages (»bumper to bumper impact«)



Bild 13 Beschädigungsbilder unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte
Fig. 13 Vehicle damages of different car conceptions

stellten Werte entsprachen den zuvor ausgemessenen normalen Einstellungen der Freiwilligen in ihren Privatfahrzeugen.

Die exakten Massen der Versuchsfahrzeuge wurden durch eine Wägung (Fehlertoleranz $\pm 5 \text{ kg}$) ermittelt. Am gestoßenen Fahrzeug wurde der erste Gang eingelegt und die Handbremse angezogen.

Der komplette Versuchsaufbau ist im **Bild 4** skizziert. Die Kollisionsgeschwindigkeit des auffahrenden Fahrzeugs wurde mit Hilfe einer Sportlichtschranke gemessen. In beiden Fahrzeugen war zum Anstoßzeitpunkt ein Unfalldatenspeicher (UDS der Firma Mannesmann Kienzle) installiert. Mit Hilfe der hauseigenen Meßtechnik des Ingenieurbüros Schimmelpfennig+Becke wurden im angestoßenen Fahrzeug die Längsbeschleunigung (zusätzlich zum UDS) und Vertikalbeschleunigung der Fahrgastzelle erfaßt. Als biomechanische Beschleunigungssignale wurden die Kopf- und Brustbeschleunigung aufgezeichnet. Zusätzlich wurde die neurologische Aktivität verschiedener Nackenmuskeln mit Hilfe von EMG (Elektromyographie)-Oberflächenelektroden erfaßt und parallel zu den Beschleunigungssignalen eingelesen.

Die Bewegungen der Probanden vor, während und nach der Kollision wurden mittels einer Hochgeschwindigkeitskamera (60 bis 100 Bilder/Sekunde) und einer Videokamera (25 Bilder/Sekunde) dokumentiert.

Die Bewegungen von Fahrzeug, Sitz, Kopfstütze und Proband wurden

gemäß **Bild 5** über Bewegungsmarker in ein hochauflösendes Abtastsystem millimetergenau eingelesen. Die Marker bestanden aus retroreflektierender Scotch-Lite-Folie. Bei Einsatz von 10 Bewegungsmarkern lag die Bildwiederholfrequenz bei 732 Hz. Betreut wurde die Bewegungsanalyse durch das Institut für Sportmedizin der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster.

Bild 5 zeigt weiter, daß während des Crash-Tests die Antizipation der Freiwilligen ausgeschlossen wurde. Dies geschah durch vollständige, akustische (Einspielung lauter Rockmusik über Kopfhörer) und visuelle (Augenbinde) Abschirmung von der Außenwelt.

Nach den Versuchen wurden die Beschädigungen der Versuchsfahrzeuge dokumentiert. Hierzu zeigt **Bild 6** ein Beispiel einer Auffahrkollision.

Am Tag nach dem Crash und 4 bis 5 Wochen nach einer Pkw und Autoskooter-Kollision fanden bei den Testpersonen medizinische Nachuntersuchungen statt, die exakt denjenigen der bereits beschriebenen Voruntersuchungen entsprachen.

Bei den Skooter-Kollisionen (**Bild 7**) wurde der gleiche Versuchsablauf realisiert.

5 Kollisionsparameter

Bild 8 zeigt eine Tabelle mit einer Auswahl der wesentlichen technischen Kollisionsparameter. Aus dem aufgezeichneten Beschleunigungssignal der Fahrgastzelle ließ sich die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung Δv_i als Zeitintegral berechnen. Unter Berücksichtigung der Stoßdauer T konnte die mittlere Beschleunigung der Fahrgastzelle über den Zusammenhang

$$a_{im} = \frac{\Delta v_i}{T} \quad (\text{Gl. 1})$$

zusätzlich als Kenngröße angegeben werden.

Bild 9 veranschaulicht die hierdurch auftretende Vereinfachung. Die Fläche unter der Kurve des Beschleunigungssignals entspricht dabei der Fläche des durch die mittlere Beschleunigung und die Stoßdauer aufgespannten Rechtecks. Die mittlere Beschleunigung eignet sich also als zusätzliche Kenngröße, wenn Stöße mit unterschiedlichen Kollisionsdauern miteinander verglichen werden sollen.

Jeweils 7 der Pkw-Heckkollisionen wurden mit 100 % und 50%-iger Überdeckung der Fahrzeugstrukturen und jeweils eine Kollision mit 30 %, 75 %- und 85 %-Überdeckung gefahren. Interessant ist die Feststellung, daß die mittlere Kollisionsdauer sowohl der Auffahrkollisionen als auch der Autoskooter-Kollisionen bei 0,12 s lag.

Die gutachterliche Praxis bei der Analyse von Auffahrkollisionen auf vergleichsweise geringem Relativgeschwindigkeitsniveau zeigt, daß es sich oft um sog. »Bagatellunfälle« handelt. Bei diesem Unfalltyp ist eine polizeiliche Unfallaufnahme nicht die Regel. Insofern sind Anknüpfungstatsachen in Form von Unfallspuren auf der Fahrbahn und Fahrzeugendstellungen die Ausnahme. Aus diesem Grund kommt den durch Lichtbilder objektivierten Fahrzeugschäden eine wesentliche Bedeutung im Rahmen der technischen Ermittlung der Anstoßintensität zu. Die im folgenden exemplarisch vorgestellten Karosserieverformungen bilden in Verbindung mit den jeweils bekannten Kollisionsparametern eine wichtige Arbeitsgrundlage für den Unfallsachverständigen.

Die aus den Verformungen ermittelte Aufprallgeschwindigkeit allein ist noch nicht aussagekräftig für die aus dem Anstoß resultierende Insassenbelastung. Es sind weitere Einflußfaktoren zu berücksichtigen:

– Überdeckungsgrad

Der Überdeckungsgrad beschreibt das Verhältnis der Kontaktbreite zur Fahrzeugbreite in %. Mit zunehmendem Überdeckungsgrad nimmt die Kontaktfläche der beteiligten Karosserieteile zu. Hierdurch steht eine größere Fläche zum Kraftaustausch zur Verfügung. Bei gleicher Eindringtiefe ergibt sich theoretisch ein größerer Anteil teilelastischer Rückverformung, also ein größerer k -Faktor. Hierdurch müßte theoretisch die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung des gestoßenen Fahrzeugs bei gleicher Anstoßgeschwindigkeit mit zunehmendem Überdeckungsgrad ansteigen.

Dieser theoretisch erwartete und bei Anstößen auf geringerem Ge-



Bild 14 Beschädigungsbilder der Versuchsfahrzeuge mit und ohne Anhängerkupplung

schwindigkeitsniveau nachgewiesene Effekt konnte bei einem Relativgeschwindigkeitsniveau von um 20 km/h nicht mehr beobachtet werden. Dies läßt sich durch den größeren Anteil plastischer Verformungen im Vergleich zu Kollisionen auf geringem Geschwindigkeitsniveau erklären. Der grundsätzliche Zusammenhang wurde bereits in [10] erklärt. Zu erkennen sind aber im Beispiel auf **Bild 10** umfangreiche Fahrzeugverformungen bei der teilüberdeckten Kollision. Aus der laienhaften Beurteilung wird hieraus oft fälschlicherweise eine im Vergleich zum linken Beispiel höhere Anstoßintensität und Insassenbelastung abgeleitet.

– Höhenzuordnung der Kontaktzonen

Auch die Anstoßhöhe beeinflusst die Verformungscharakteristik und die hieraus resultierende Insassenbelastung. Bei Auffahrkollisionen verbleibt dem Fahrer des auffahrenden Fahrzeugs vor dem Anstoß in den meisten Fällen noch Zeit, sein Fahrzeug abzubremsen. Dabei kommt es, wie auf der unteren Grafik im **Bild 11** gezeigt, aufgrund der dynamischen Achslastverlagerung zu einem Eintauchen der Fahrzeugfront (nose-diving).

Da die Stoßfänger beider Fahrzeuge konstruktionsbedingt im ungebremsten Zustand in gleicher Höhe liegen, kommt es zwangsläufig zu einem Unterfahren des Stoßfängers am gestoßenen Fahrzeug. In Anlehnung an hier durchgeführte Messungen [22, 23] wurde im Versuch die Front des auffahrenden Fahrzeuges um ca. 7 bis 8 cm tiefergelegt. Hierdurch bedingt kommt es zu einem direkten Kontakt der Scheinwerferebene mit dem Heckstoßfänger und nicht mehr wie beim ungebremsten Aufprall zu einem Kraftaustausch zwischen den konstruktiv hierfür ausgelegten Stoßfängerpartien. Dies wird bei den meisten praktischen Versuchsreihen zur Belastbarkeit der Halswirbelsäule nicht hinreichend beachtet. Im Regelfall der Auffahrkollision tritt ein deutlich höhenversetzter Anprall infolge des Eintauchens der Fahrzeugfront auf. Deshalb ist es für die Praxis wenig aussagekräftig, wenn in den Tests nur »Stoßfänger auf Stoßfänger«-Anstöße simuliert werden.

Bild 12 zeigt ein Beispiel: Hier ist anhand eines »Stoßfänger auf Stoß-



Fig. 14 Vehicle damages with or without trailer coupling

fänger«-Anpralls der Einfluß der Anstoßhöhe auf die Verformungscharakteristik dargestellt. Identische Fahrzeuge nach einer »Unterfahrkollision« sind bereits in Bild 10 (linker Teil) dokumentiert. Durch das Unterfahren zeigt die Fahrzeugfront des auffahrenden Opel Rekord E 2 die Anstoßzone in Scheinwerferebene, wohingegen beim rechts abgebildeten Opel Rekord E 2 der Kraftaustausch direkt über den Frontstoßfänger erfolgte. Er wurde über die gesamte Breite an die Fahrzeugkarosserie herangedrückt.

– Fahrzeugkonzepte

Bild 13 dokumentiert Heckbeschädigungen an Vertretern unterschiedlicher Fahrzeugkonzepte. Bei den oft verhältnismäßig strukturweich konstruierten Stufenheck-Limousinen läßt der an der Fahrzeugkarosserie quasi »angehängte« Kofferraum große Deformationstiefen zu. Dies gilt insbesondere dann, wenn im Gegensatz zum abgebildeten Beispiel des Opel Rekord der Kraftstofftank vor der Hinterachse montiert ist.

Aus der Praxis ist bekannt, daß beispielsweise ältere Audi- und Opel-Stufenheck-Modelle sehr verformungsfreudige Heckpartien besitzen. Bei den ebenfalls in Bild 13 gezeigten Fließheck- bzw. Kombi-Fahrzeugen ist im Gegensatz zur Stufenheck-Limousine der Heckrahmen tragendes Bauteil, so daß diese Fahrzeuge am Heck struktursteifer ausgelegt werden.

– Anhängerkupplung

Insbesondere am Fahrzeugheck sind erhebliche Veränderungen der Struktursteifigkeit durch Anbauteile zu beobachten:

Einen strukturversteifenden Einfluß hat die Ausstattung des gestoßenen Pkw mit einer Anhängerkupplung insbesondere bei den weichen Stufenheck-Fahrzeugen. Die hierzu notwendigen Modifikationen an den Anbindungspunkten der Anhängerkupplung führen zu einer höheren Steifigkeit des Fahrzeughecks.

Im Fall einer Kollision wirkt sich dieser Effekt deutlich auf das Deformationsverhalten aus. **Bild 14** zeigt hierzu die unterschiedlichen Beschädigungsbilder zweier identischer Versuchsfahrzeuge mit und ohne Anhängerkupplung:

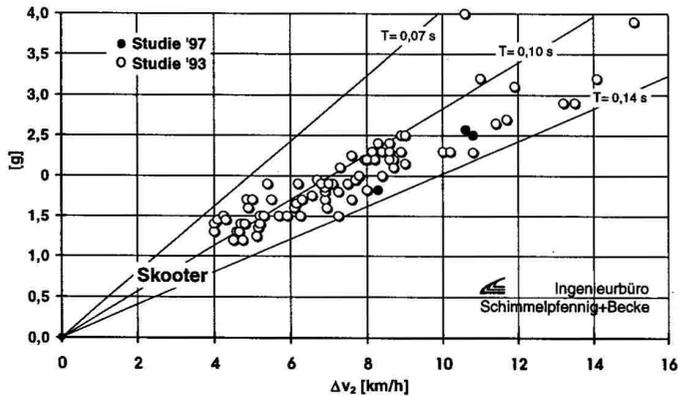


Bild 15 Meßwerte Skooter-Versuche
Fig. 15 Measurement of bumper car collisions

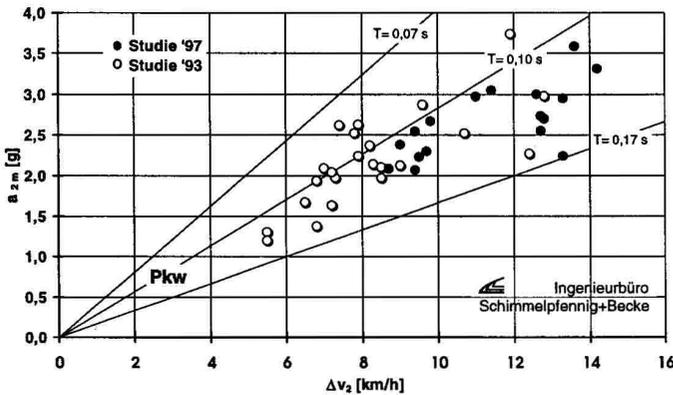


Bild 16 Meßwerte Pkw-Versuche
Fig. 16 Measurement of vehicle rear-end collisions

Die Deformationen resultieren aus einer annähernd gleichen Anstoßgeschwindigkeit. Wie erwartet, weichen die Eindringtiefen stark voneinander ab. Die Auswertung der Beschleunigungsdaten ergab jedoch für beide Versuchs-Pkw eine annähernd gleiche Belastung in Form einer Geschwindigkeitsänderung von knapp 10 km/h und einer mittleren Beschleunigung von gut 2 g. Dieses Beispiel verdeutlicht, daß geringe Deformationen bei dem Fahrzeug mit Anhängerkupplung nicht zu der Annahme führen dürfen, die Höhe der Anstoßgeschwindigkeit und damit auch verbunden die Höhe der Insassenbelastung seien ähnlich gering gewesen. In Kenntnis dieser Abhängigkeit ist daher generell davor zu warnen, zur Beurteilung der biomechanischen Insassenbelastung die Reparaturkostenhöhe oder sogar Faustformeln wie beispielsweise »1 cm Verformungstiefe = 1 km/h Geschwindigkeitsänderung« heranzuziehen. Diese Faustformel ist häufig in Gutachten zur Verletzungskausalität medizinischer Experten enthalten. Die gleichen Schlußfolgerungen gelten natürlich auch für Pkw mit einer abnehmbaren Anhängerkupplung. Hier wird nur der Kugelkopf entfernt. Die Hakenaufnahme und die verstärkenden Verstrebungen sind jedoch noch vorhanden, aber schwer erkennbar hinter Stoßfängerverkleidung bzw. der Heckschürze verborgen.

6 Vergleich Autoskooter- und Pkw-Kollision

Bereits in der Studie 93 wurden der konstruktive Aufbau, die Sitzkonstruktion, die Meßfahrten auf dem Jahrmarkt und das Kollisionsverhalten von Autoskootern beschrieben. Somit kann hier auf eine umfassende Wiedergabe der damaligen Untersuchungsergebnisse verzichtet werden.

In der Studie 97 wurden Kollisionsversuche mit zwei Autoskootern durchgeführt, um die bestehenden Analogien weiter durch Meßdaten zur Bewegungsanalyse zu belegen. Hierbei wurde auch die Beschleunigungseinwirkung auf die Karosserie des auffahrenden Autoskooters

untersucht. Dadurch ist es nunmehr erstmalig möglich, die Beschleunigungssignale, die daraus über das Zeitintegral berechenbaren Geschwindigkeitsverläufe und die Kollisionscharakteristik eines Autoskooter-Anstoßes und einer Pkw-Auffahrkollision vergleichend gegenüberzustellen. Dies gelingt durch Angabe der Stoßzeit T , der Stoßziffer k oder der Trennungsgeschwindigkeit $\Delta v'$.

Bild 15 zeigt, daß die meßtechnisch genau erfaßten Skooter-Anstöße aus 97 im oberen Drittel der bei einer zufälligen Meßfahrt [10] ermittelten Anstoßschwere liegen. Häufig kommt es also zu noch deutlich heftigeren »Anstößen« zwischen Skootern. Die Darstellung läßt auch erkennen, daß die Stoßzeit T unabhängig von der Geschwindigkeitsänderung und damit ebenfalls unabhängig von der Anstoßgeschwindigkeit ist. Gemäß Gl. (1) müssen Stöße gleicher Zeitdauer auf einer Ursprungsgeraden liegen. Die Stoßzeiten sämtlicher Autoskooter-Kollisionen liegen in einem Bereich zwischen 0,07 s und 0,14 s. Die mittlere Stoßzeit beträgt 0,10 s.

Bild 16 dokumentiert die identische Beziehung für die Pkw-Auffahrkollisionen. Die hellgrau unterlegten Symbole kennzeichnen hierbei die Kollisionen der 93-er Studie, wohingegen die schwarzen Symbole die aktuellen Versuche der Studie 97 dokumentieren. Es fällt auf, daß die aus einem höheren Differenzgeschwindigkeitsniveau resultierenden dunklen Symbole sich in der Mehrzahl unterhalb der Stoßzeitlinie $T = 0,10$ s gruppieren. Gemeinsam ist jedoch allen Werten, daß sie oberhalb der Ursprungsgeraden liegen, die eine Kollisionsdauer von 0,17 s kennzeichnet. Die längste bei den Autoskooter-Kollisionen gemessene Kollisionsdauer von 0,14 s wurde im Rahmen der Studie 97 nur von zwei Pkw-Kollisionen überschritten. Es handelte sich hierbei um zwei »Unterfahr«-Kollisionen in Verbindung mit einem teilweisen Abgleiten der Kontaktflächen.

Die Bilder 17 und 18 ermöglichen einen detaillierten Vergleich der Kollisions-Charakteristika einer Pkw- und Autoskooter-Auffahrkollision. Dokumentiert sind hier die zeitlichen Verläufe der Fahrgastzellenverzögerungen von auffahrendem Pkw bzw. Autoskooter (a_1) und Beschleunigungen des in Stillstandsposition angestoßenen Pkw bzw. Autoskooter (a_2). Als hervorgehobene Linienzüge sind die berechneten Geschwindigkeitsverläufe vom auffahrendem (v_1) und angestoßenem (v_2) Versuchsfahrzeug über die Stoßzeit in die Diagramme eingezeichnet.

Die aufgezeichneten Beschleunigungssignale entstammen dem in jedem Versuchsfahrzeug installierten Unfalldatenspeicher, der über den Kollisionszeitraum mit einer Abtastfrequenz von 500 Hz aufzeichnet.

Bild 17 dokumentiert eine Pkw-Auffahrkollision. Zum Zeitpunkt $t = 0$ s prallt ein Opel Kadett Caravan mit einer Geschwindigkeit von 20,5 km/h auf das Heck des stehenden Opel Rekord. Durch den Anstoß wird das heckseitig getroffene Fahrzeug beschleunigt und das anstoßende Fahrzeug verzögert. Etwa 90 ms nach Kollisionsbeginn ist die Kompressionsphase abgeschlossen. Beide Fahrzeuge besitzen im Schnittpunkt der Geschwindigkeitsverläufe (v_1, v_2) exakt gleiche Geschwindigkeiten.

Im Rahmen der sich anschließenden Restitutionsphase stoßen sich die Kontaktflächen voneinander ab. Am Ende des gesamten Vorgangs nach 120 ms fährt der Stoßende mit 7 km/h und der Gestoßene mit 10 km/h, die Trennungsgeschwindigkeit $\Delta v'$ liegt also bei 3 km/h. Bei der gewählten Versuchskonstellation (gestoßenes Fahrzeug steht) entspricht die Stoßausgangsgeschwindigkeit v_2' der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung Δv_2 des angestoßenen Fahrzeugs.

Bild 18 beschreibt die entsprechenden Verhältnisse eines Skooter-Anstoßes. Im exemplarisch vorgestellten Versuch prallte der auffahrende Skooter mit einer Geschwindigkeit von 13,5 km/h auf das Heck des stehenden zweiten Skooters. Auffällig ist hier, daß beide Fahrzeuge bereits nach 60 ms (die Hälfte der Gesamtkollisionsdauer) eine gemeinsame Schwerpunktschwindigkeit von knapp 7 km/h erreichen. Aufgrund des elastischen Kollisionscharakters durch die mit Luft befüllten Prallringe ist die Restitutionsphase länger als bei der in Bild 17 beschriebenen Pkw-Kollision. Am Ende der Kollision fährt der auffahrende Skooter nur noch mit 1,5 km/h, der angestoßene Skooter wurde auf eine Geschwindigkeit v_2' von knapp 11 km/h katapultiert, die Trennungsgeschwindigkeit Δv_2 der Autoskooter liegt also bei ca. 9,5 km/h.

Außer durch die Angabe der Trennungsgeschwindigkeit $\Delta v'$ läßt sich

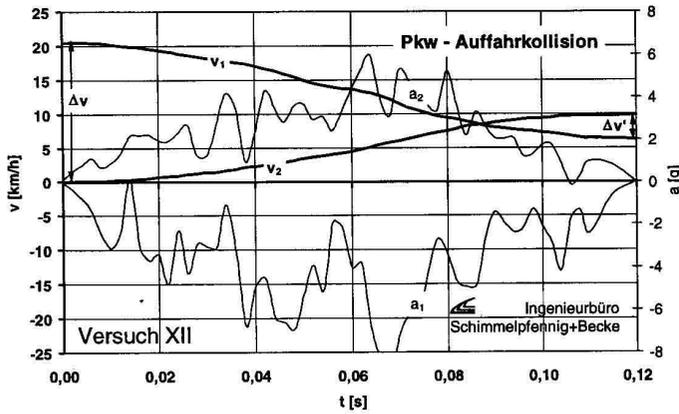


Bild 17 Pkw-Kollision
Fig. 17 Vehicle rear-end collision

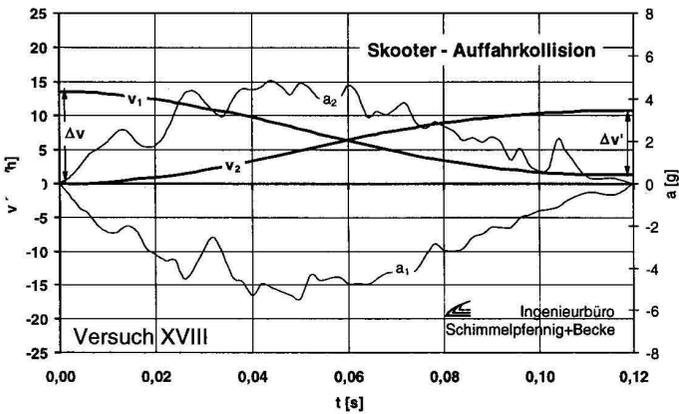


Bild 18 Skooter-Kollision
Fig. 18 Bumper car collision

das unterschiedliche Kollisionsverhalten einer Pkw-Auffahrkollision im Vergleich zu einer Skooter-Kollision durch Angabe der Stoßziffer

$$k = \frac{v'_2 - v'_1}{v_1 - v_2} = \frac{\Delta v'}{\Delta v} \quad (\text{Gl. 2})$$

beschreiben. Für die vorliegenden Beispiele der Bilder 17 und 18 läßt sich die Stoßziffer mit $k = 0,14$ (Auffahrkollision Pkw) und $k = 0,70$ (Skooter-Anstoß) angeben.

Um dem Unfallanalytiker unmittelbar anwendbare Entscheidungshilfen bei der Beurteilung von teilelastischen Pkw-Kollisionen zu liefern, lassen sich für die 17 Pkw-Pkw-Auffahrkollisionen folgende Mittelwerte angeben:

	k-Faktor	Trennungsgeschwindigkeit
Große Überdeckung (75 bis 100 %)	0,20	3,7 km/h
Geringe Überdeckung (30 bis 50 %)	0,10	2,5 km/h
Alle Versuche	0,15	3,3 km/h

Bild 19 Meßwertvergleich mit und ohne Anhängerkupplung
Fig. 19 Comparison of measurement with or without trailer coupling

Somit sind die Mittelwerte dieser Kollisionsparameter, die aus einer mittleren Anstoßgeschwindigkeit von 21 km/h resultieren, deutlich geringer als die in der Studie 93 aus einer mittleren Anstoßgeschwindigkeit von 13 km/h resultierenden Parameter. Wie bereits mehrfach publiziert, nähern sich die Pkw-Anstöße mit zunehmendem Geschwindigkeitsniveau der plastischen Kollision ($k = 0$, $\Delta v' = 0$ km/h) [6].

Um eine kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung von 10 km/h zu

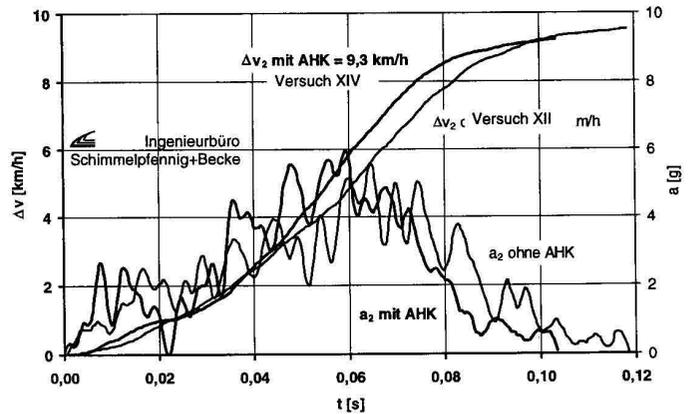


Bild 20 Meßwerte bei unterschiedlicher Kollisionsdauer
Fig. 20 Measurement with different collision duration

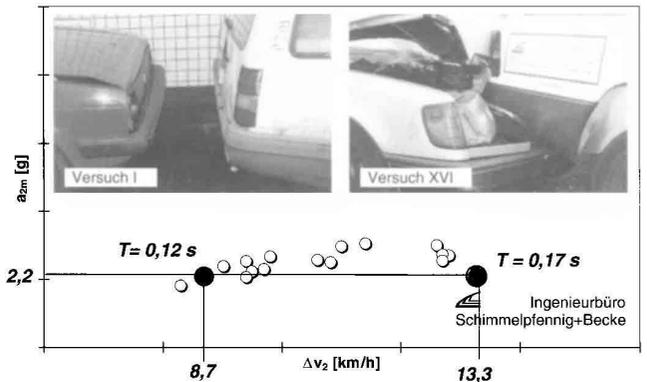


Bild 21 Kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung in Abhängigkeit der massenbewerteten Differenzgeschwindigkeit
Fig. 21 Change in velocity dependent on weight adjusted velocity

erreichen, muß ein Skooter nur mit 12 km/h auffahren, während ein Pkw mit etwa 17 km/h aufprallen muß (gleiche Massen vorausgesetzt). Der Grund hierfür ist das unterschiedliche Kollisionsverhalten (stark elastisch beim Skooter, nahezu plastisch beim Pkw).

Aufgrund des relativ umfangreichen Untersuchungsinhaltes wird auf die Problematik der EES-Wert-Ermittlung der einzelnen Versuchsfahrzeuge unter Verwendung einer separaten Versuchsreihe (Barrieren-Anprallversuche mit identischen Fahrzeugen) in einer Folgeveröffentlichung speziell eingegangen. Gleiches gilt für den Einfluß der Bremsung. Auch die detaillierte Bewegungsanalyse muß aufgrund der hohen Anzahl der aufgezeichneten Bewegungsdaten und sich bereits zum jetzigen Auswertestadium abzeichnender überraschender Erkenntnisse einer separaten Veröffentlichung vorbehalten bleiben.

7 Medizinische Untersuchungen

Die Auswertung der medizinischen Voruntersuchung ergab, daß 8 der 19 Probanden vor den Crash-Tests schon einmal HWS-Beschwerden hatten. In der kernspintomographischen Voruntersuchung wiesen 6 Probanden degenerative Veränderungen (bspw. Bandscheibenprotusion) auf. Zum Zeitpunkt des Versuchs waren alle Freiwilligen beschwerdefrei. Die Auswertung der ersten Nachuntersuchung (1 Tag nach dem Crash) ergab, daß 4 männliche Probanden und eine weibliche Probandin Beschwerden schilderten. Diese waren kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderungen zwischen 11,4 und 14,2 km/h ausgesetzt. Die klinischen Untersuchungen zeigten keine Verletzungsfolgen und die kernspintomographischen Befunde wiesen keinerlei Veränderungen zu den Voruntersuchungen auf.

Die abschließende Untersuchung (4 bis 5 Wochen nach dem Crash) ergab, daß nur noch ein Proband von den zuvor 5 Probanden Beschwerden angab. Diese bestanden aus einer leichten Einschränkung

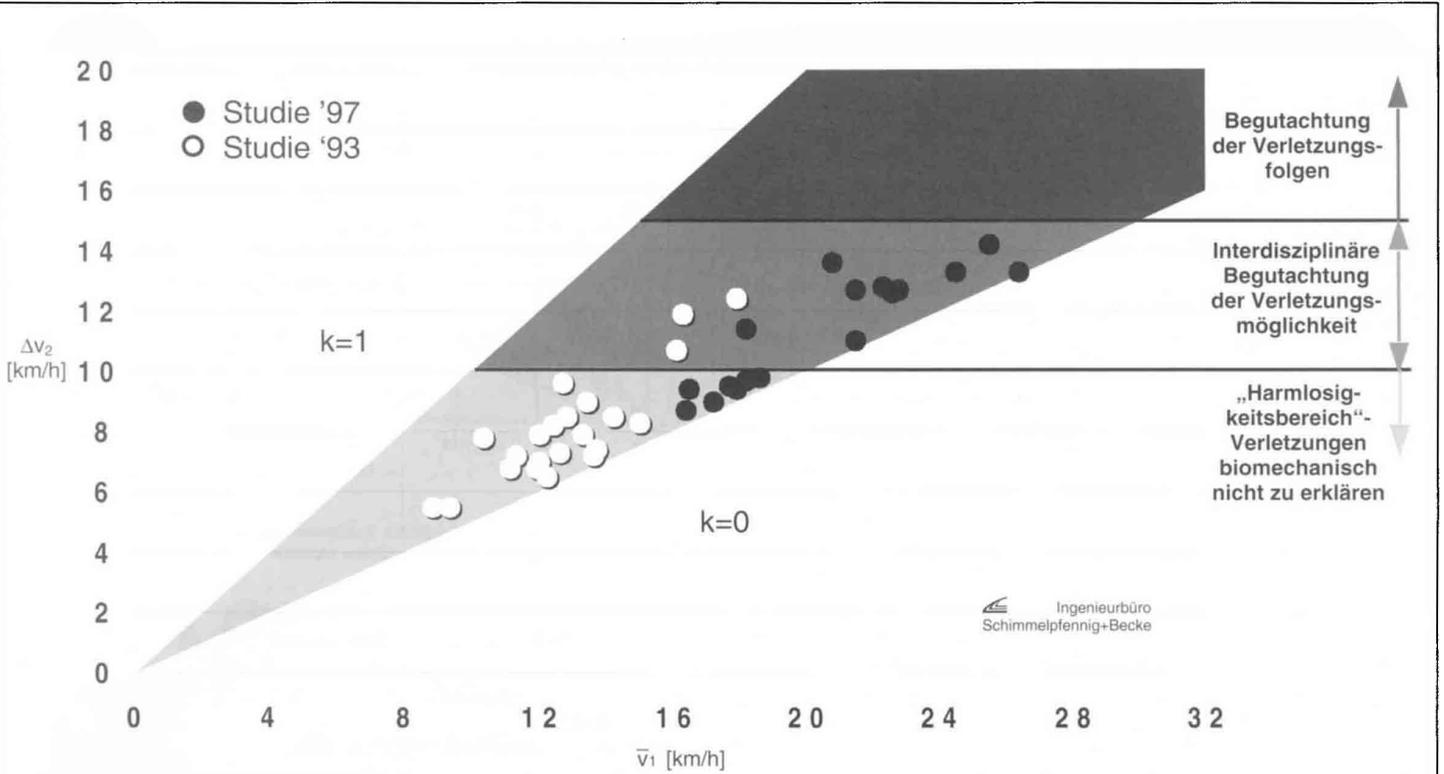


Bild 22

der Linksrotation insbesondere in Flexion von 10°. Die Beschwerden der anderen 3 männlichen Probanden und der Probandin waren nach 1 bis 7 Tagen vollständig abgeklungen. Die kernspintomographischen Untersuchungen wiesen auch zu diesem Untersuchungszeitpunkt keinerlei Veränderungen zu den Voruntersuchungen auf. Verletzungsfolgen fanden sich auch bei dieser letzten Untersuchung nicht. Zu keiner Zeit war einer der Probanden trotz subjektiv empfundener Beschwerden an der weiteren Ausübung seiner beruflichen Tätigkeit gehindert.

8 Diskussion

In der jüngsten Vergangenheit erschienen in der Literatur zunehmend Arbeiten zur HWS-Problematik, die nicht auf der Erfahrung experimenteller Grundlagenuntersuchungen unter Beteiligung Freiwilliger basieren. U.a. werden »Statistiken« auf der Grundlage von aus Real-Unfallbildern rekonstruierten Geschwindigkeitsänderungen und einer Patientenbefragung vorgestellt [14, 15, 4]. In einer Arbeit [14, 15] wird von den Autoren auch angeführt, daß sich reale Unfallsituationen nicht mit Anprallsituationen in Autoskootern vergleichen lassen und Fahrzeuge mit Anhängerkupplung bei gleichem Stoßimpuls eine andere Verzögerungscharakteristik aufweisen sollen, als Fahrzeuge ohne Anhängerkupplung. Begründet wird diese Hypothese hinsichtlich der fahrzeugspezifischen Kollisionscharakteristik mit einer vergleichenden Darstellung zweier Kopfbeschleunigungsverläufe eines Autoskooter- und eines Pkw-Insassen, die aus unserem Hause stammen.

Da die quantitativen Verläufe dieser Beschleunigungssignale lediglich zur Beschreibung der Anprallhärte des Kopfes an der Kopfstütze geeignet sind und keinesfalls Rückschlüsse auf die Verformungs- bzw. Beschleunigungscharakteristik der Fahrzeugkarosserie zulassen, liegt hier eine Fehlinterpretation der Meßwerte vor. Wie in Bild 17 und 18 ersichtlich, sind die Verläufe der Fahrgastzellenbeschleunigung – und nur hierauf kommt es zunächst an – durchaus sehr gut vergleichbar.

Auf der Grundlage der im Rahmen unserer Studie vergleichend durchgeführten Anstoßsituation identischer Pkw mit und ohne Anhängerkupplung läßt sich ein wesentlicher Unterschied in der Beschleunigungscharakteristik entgegen der oben geäußerten Auffassung nicht ableiten. **Bild 20** zeigt die Beschleunigungscharakteristik und den Geschwindigkeitsverlauf einer Versuchsreihe. Die zugehörigen Beschädigungsbilder

und Kollisionsparameter wurden bereits im Bild 14 vorgestellt. Es prallten identische Opel Kadett auf Opel Rekord mit und ohne Anhängerkupplung. Hier zeigten sich weder hinsichtlich der auftretenden Beschleunigungsspitzen, noch im Anstiegsverhalten der Geschwindigkeitsverläufe signifikante Unterschiede, obwohl beide Beschleunigungsverläufe aus einer annähernd identischen Kollisionsgeschwindigkeit des auffahrenden Versuchsfahrzeugs resultierten.

In **Bild 21** sind zwei sehr unterschiedliche Auffahrkollisionen einander gegenübergestellt. Das linke Foto zeigt einen flächigen Stoßfängeranprall eines Golf auf einen Kadett Kombi mit 19,5 km/h, das rechte Foto einen stark gebremsten Aufprall eines Mercedes 124 auf einen zweiten Mercedes 124 Kombi mit 27,5 km/h, bei dem die struktursteife Stoßfängerebene weit unter das Kombi-Heck gerutscht ist. Die mittlere Zellenbeschleunigung war in beiden Versuchen etwa gleich. Die Dauer des kollisionsbedingten Kraftaustausches war bei dem unterfahrenen Mercedes-Anstoß mit 170 ms viel länger als bei dem harten Stoßfängeranprall des Golf mit 120 ms. Interessant ist nunmehr der gravierende Unterschied der Geschwindigkeitsänderungen Δv_2 . Mit 8,7 km/h und 13,3 km/h wurde die kleinste und einer der höchsten Geschwindigkeitsänderungen der Pkw-Heckanstoße in der Studie 97 gemessen. Aus dieser Erfahrung heraus bietet sich für die forensische Begutachtungspraxis an, am international etablierten Kriterium der Geschwindigkeitsänderung zur Beschreibung der Insassenbelastung festzuhalten, da man sich dabei immer auf der »sicheren Seite« befindet.

Kennt man die Geschwindigkeitsänderung, ergibt sich bei Annahme einer Kollisionsdauer von 0,1 s die denkbare höchste mittlere Beschleunigung. In keiner der hier durchgeführten Pkw-Kollisionen wurde eine kürzere Einwirkdauer auf die Fahrgastzelle beobachtet. Alle genannten Werte zur Verletzungsmöglichkeit beziehen sich auf Versuche, denen eine kurze Kollisionsdauer und damit auch eine hohe Belastung zugrunde liegt.

Große Bedeutung für die forensische Praxis kommt den Ergebnissen der bereits in Bild 1 aufgelisteten experimentellen Studien zu. Ein Nachteil fast sämtlicher Untersuchungen ist jedoch die zu geringe Belastung, d.h. aus der Mehrzahl der simulierten Heck-Crashes resultierten kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderungen von maximal 10 km/h. Um die Ergebnisse der in dieser Arbeit beschriebenen Studie hinsichtlich ihrer technischen Kollisionsparameter besser einordnen zu können,

zeigt Bild 22 zusammengefaßt die unter kollisionsmechanischen Gesichtspunkten aufbereiteten Ergebnisse aller im Jahre 1993 und im Rahmen dieser Arbeit beschriebenen Auffahrkollisionen. Die Ergebnisse der Studie 93 sind mit hellen Symbolen und die der 97-er Studie mit dunklen Symbolen illustriert. Auf der Abszisse ist die massenbewertete Aufprallgeschwindigkeit in km/h aufgetragen. Durch die Umrechnung der Aufprallgeschwindigkeit wird der Einfluß des Massenverhältnisses kompensiert. Die Grafik enthält somit nicht mehr den aus unterschiedlichen Fahrzeuggewichten resultierenden Einfluß und ist deshalb besser geeignet, Anstoßvorgänge zu vergleichen. Die Geschwindigkeitsänderung im gestoßenen Fahrzeug hängt bei gegebener massenbewerteter Aufprallgeschwindigkeit nur von der Verformungscharakteristik bzw. ihrer mathematischen Beschreibung durch die Stoßziffer k bzw. die Trennungsgeschwindigkeit $\Delta v'$ ab. Bei Kollisionspartnern gleichen Gewichts entspricht die massenbewertete Aufprallgeschwindigkeit exakt der Anstoßgeschwindigkeit des auffahrenden Fahrzeugs.

Auf der Ordinate ist in diesem Bild die gemessene Geschwindigkeitsänderung aufgetragen. Jedes schwarze Symbol innerhalb der Fläche beschreibt eine Pkw-Auffahrkollision der Studie 97.

Der im unteren Teil des Bildes hellgrau umrandete Bereich beinhaltet bis zu einer Geschwindigkeitsänderung von 10 km/h nicht nur den größeren Anteil der von uns durchgeführten Versuche, sondern auch die Ergebnisse vieler internationaler Arbeiten (vgl. Bild 1). Als Teilergebnis unserer Studie kann daher formuliert werden, daß durch eine Geschwindigkeitsänderung von bis zu 10 km/h Verletzungen an der Halswirbelsäule eines Insassen im gestoßenen Fahrzeug sehr unwahrscheinlich sind.

Aus den Erfahrungen mit Skooter-Anlagen lassen sich noch weitergehende Erkenntnisse ableiten. Da bisher keine statistisch relevanten Fälle von Verletzungen der Halswirbelsäule nach Skooter-Anstößen bekannt sind, kann der Rückschluß gezogen werden, daß Geschwindigkeitsänderungen von bis zu 10 km/h unabhängig von Anstoßrichtung, Sitzkonfiguration und Kopfstützeinstellungen unkritisch sind.

Bei Anstoßvorgängen in dem in der Grafik dunkel umrandeten Bereich ist nach dem bisherigen Kenntnisstand eine interdisziplinäre (technisch-medizinische) Beurteilung der Verletzungskausalität erforderlich. Hier sind dann neben den technischen Kollisionsparametern auch individuelle Einflußgrößen im Rahmen der interdisziplinären Begutachtung zu berücksichtigen.

Bisher führten lediglich Szabo et al [19] 6 Pkw-Pkw-Auffahrkollisionen mit Freiwilligen im Alter von 27 bis 38 Jahren aus, die vor und nach den Versuchen auch mit einer Kernspin- und Computertomographie untersucht wurden. Hier betrug die Geschwindigkeitsänderung ca. 8 km/h. Die Bildgebung zeigte einerseits degenerative Veränderungen, andererseits nach der Belastung keine Verletzungsfolgen. Auch in unserer Studie mit einer Geschwindigkeitsänderung Δv_2 bis 14,2 km/h konnten bei der definierten klinischen und kernspintomographischen Untersuchung vor und nach der Auffahrkollision weder länger bestehende Beschwerden, noch Veränderungen durch das zur Zeit beste bildgebende Verfahren (Kernspintomographie mit Kontrastmittel) festgestellt werden. Lediglich 5 Probanden beklagten nach der Kollision leichte Beschwerden. Die Schmerzsymptomatik dauerte jedoch nicht länger als eine Woche an und eine Arbeitsunfähigkeit ist nicht eingetreten. Sie waren auch sonst nicht in der Ausübung alltäglicher Tätigkeiten oder sportlicher Aktivitäten eingeschränkt. Die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung lag bei diesen Freiwilligen über 11 km/h.

Danksagung

Diese Studie wurde von der Bertelsmann-Stiftung finanziell unterstützt, der unserer besonderer Dank gilt. Den Herren Dr. C. Peuker (Radiologe im Clemenshospital) und Herrn Dr. K. Wörtler (Radiologe im Klinikum der Universität Münster) danken die Autoren für ihre fachliche Unterstützung bei der medizinischen Erhebung der Studienergebnisse.

Formelzeichen

s	Weg	m
s_{hor}	horizontaler Abstand Kopf/Kopfstütze	cm
s_{ver}	vertikaler Abstand Scheiteloberkante/Kopfstützenoberkante	cm
α	Winkel zwischen Sitzfläche und Rückenlehne	°
v	Geschwindigkeit	ms, km/h
v_1	Geschwindigkeit des auffahrenden Fahrzeugs zu Beginn der Kollision	km/h
v_2	Geschwindigkeit des angestoßenen Fahrzeugs zu Beginn der Kollision	km/h
v_1'	Geschwindigkeit des auffahrenden Fahrzeugs am Ende der Kollision	km/h
v_2'	Geschwindigkeit des angestoßenen Fahrzeugs am Ende der Kollision	km/h
$\bar{v}_1 = \frac{2 \cdot m_1}{m_1 + m_2} \cdot v_1$	massenbewertete Anstoßgeschwindigkeit	km/h
Δv	Relativgeschwindigkeit zweier Fahrzeuge zu Beginn der Kollision	km/h
$\Delta v'$	Trennungsgeschwindigkeit zweier Fahrzeuge am Ende der Kollision	km/h
Δv_1	kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung eines Fahrzeugs	km/h
Δv_2	kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung des angestoßenen Fahrzeugs	km/h
EES	Energieäquivalente Geschwindigkeit	km/h
a	Beschleunigung	ms ² , g
g	Erdbeschleunigung (1 g = 9,81 ms ²)	
a_1	Beschleunigung des auffahrenden Fahrzeugs	ms ² , g
a_2	Beschleunigung des angestoßenen Fahrzeugs	ms ² , g
a_{im}	mittlere Beschleunigung eines Fahrzeugs	ms ² , g
a_{2m}	mittlere Beschleunigung des angestoßenen Fahrzeugs	ms ² , g
t	Zeit	s
T	Stoßdauer	s, ms
m_1	Masse des auffahrenden Fahrzeugs	kg
m_2	Masse des angestoßenen Fahrzeugs	kg
k	Stoßziffer	

Literaturnachweis

- [1] Bührmann, R.: Experimentelle Untersuchung der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung zur Bestimmung der biomechanischen Belastung. Diplomarbeit FH Osnabrück 1997
- [2] Deutscher, C.: Bewegungsablauf von Fahrzeuginsassen beim Heckaufprall. Eurotax (International) AG, CH-8807 Freienbach, 1994
- [3] Castro, W. H. M.; Schilgen, M.; Meyer, S.; Weber, M.; Peuker, C.; Wörtler, K.: Do »whiplash injuries« occur in low-speed rear impacts? Eur Spine J (1997) 6:366-375, Springer Verlag 1997
- [4] Großer, W.; Fürbth, V.: Studie zur HWS-Verletzung, Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 36 (1998), S. 90 bis 92
- [5] Kalthoff, W.: Experimentelle Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen der Bestimmung der Insassenbewegung auf der Grundlage der Fahrzeugbeschädigungen nach Pkw-Auffahrkollisionen. Diplomarbeit FH Osnabrück 1997
- [6] Schimmelpfennig, K.-H.: Die Analyse von Serien-Auffahrunfällen mit Hilfe des Delta V-Schritt-Verfahrens. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 22 (1984), S. 73 – 75
- [7] McConnell, W. E.; Howard, R. P.; Guzman, H. M.; Bomar, J. B.; Raddin, J. H.; Benedict, J. V.; Smith, H. L.; Hattell, C. P.: Analysis of human test subject Kinematic Responses to low velocity rear end impacts. SAE Technical Paper Series 930889
- [8] Mc Connel, W. E.; Howard, R. P.; Poppel, J. V.; Krause, R.; Guzman, H. M.; Bomar, J. B.; Raddin, J. H.; Benedict, J. V.; Hattell, C. P.: Human head and neck kinematics after low velocity rear-end impacts – understanding »whiplash«, SAE-Paper 952724
- [9] Meyer, S.: Experimentelle Untersuchung des Zusammenhangs zwischen technischen Kollisionsparametern und der Bewegungskinetik von Insassen im Hinblick auf leichte HWS-Schleudertraumen. Diplomarbeit am Institut für Kraftfahrwesen der Universität Hannover 1993
- [10] Meyer, S.; Hugemann, W.; Weber, M.: Zur Belastung der Halswirbelsäule durch Auffahrkollisionen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 32 (1994), S. 15 – 21
- [11] Meyer, S.: Technische Belastungsgutachten als Grundlage der medizinischen Beurteilung. Vortragsmanuskript anlässlich des Symposiums »Schach dem Betrug« am 6./7.5.1996 Münster
- [12] Meyer, S.; Weber, M.; Castro, W.H.M.; Schilgen, M.: Biomechanische Belastung der HWS bei Fahrzeugkollisionen / Orthopädische Beurteilung des »HWS-Schleuder-Traumas«. Grundlagenseminar »HWS im Blickpunkt« Düsseldorf, Berlin, München 1997
- [13] Nielsen, G. P.; Gough, J. P.; Little, D. M.; West, D. H.; Baker, V. T.: Human subject response to repeated low speed impacts using utility vehicles. SAE Paper 970394
- [14] Otte, D.; Pohlemann, T.; Blauth, M.: Significance of soft tissue neck injuries AIS 1 in the accident scene and deformation characteristics of cars with delta-v up to 10 km/h. IRCOBI Conference-Paper, Hannover, September 1997, S. 265 – 283
- [15] Otte, D.; Pohlemann, T.; Blauth, M.: HWS-Distorsionen im geringen Unfallschwerebereich. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 36 (1998), S. 15 – 21
- [16] Scott, W. M.; Mc Connel, W. E.; Gutzmann, H. M.; Howard, R. P.; Bomar, J. B.; Smith, H. L.; Benedict, J. V.; Raddin, J. H.; Hattell, C. P.: Comparison of human and ATD head kinematic during low-speed rear-end impacts. SAE Paper 930094
- [17] Siegmund, G. P.; Williamson, P. B.: Speed change (delta v) of amusement park bumper cars. Proc. of the Canadian Multidisciplinary Road Safety Conf. VIII, June 1993

- [18] Siegmund, G. P.; David, J.K.; Lawrence, J. M.; Wheeler, J. B.; Brault, J. R.; Terry, A. S.: Head/neck kinematic response of human subjects in low-speed rear-end collisions. SAE Paper 973341
- [19] Szabo, T. J.; Welcher, J. B.; Anderson, R. D.; Rice, M. M.; Ward, J. A.; Paulo, L. R.; Carpenter, N. J.: Human occupant kinematic response to low speed rear-end-impacts. SAE Paper 940532
- [20] Szabo, T. J.; Welcher, J. B.; Human subject kinematics and electromyographic activity during low speed rear impacts. SAE Paper 962432
- [21] Tanner, C. B.; Chen, H. F.; Wiechel, J. F.; Brown, D. R.; Guenther, D. A.: Vehicle and occupant response in heavy truck to car low speed rear impacts, SAE Paper 970120
- [22] Weber, M.; Dieling, W.: Die Zuordnung von Beschädigungszonen bei Berücksichtigung von Beladung, Verzögerung und Querbeschleunigung. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 28 (1990), S. 179 – 182
- [23] Weber, M.: Die Aufklärung des Kfz-Versicherungsbetruges – Grundlagen der Kompatibilitätsanalyse und Plausibilitätsprüfung. 1. Auflage, Schriftenreihe Unfallrekonstruktion, Münster 1995 – ISBN 3-9804383-0-9
- [24] West, D. H.; Gough, J. P.; Harper, G. T. K.: Low speed rear-end-collision testing using human subjects, Accident Reconstruction Journal, May/June 1993

1 Ein Mann nahm sowohl an einer Pkw-Kollision als auch an einem Autoskooter-Anstoß teil. ■