

Stefan Meyer\*

## Zur Belastung der Halswirbelsäule bei Lkw-Pkw-Auffahrkollisionen

### Einfluß des Massenverhältnisses auf die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung

#### Zusammenfassung

In einer Reihe von 8 Lkw-Pkw-Auffahrkollisionen auf einem Differenzgeschwindigkeitsniveau von 3 bis 20 km/h wird der Einfluß des Massenverhältnisses auf die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung des Pkw experimentell untersucht. Für die Beurteilung der biomechanischen Insassenbelastung im Hinblick auf Verletzungen der HWS wird die Bedeutung des teilelastischen Kollisionscharakters bei der Berechnung der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung im Bereich um die »Harmloskeitsgrenze« von 10 km/h erläutert.

#### Summary

In 8 (truck/car) rear-end-collisions the dependency between mass proportion and change of car velocity is determined. For describing the biomechanical loading of the cervical spine complex the part-elastic character of collisions is explained.

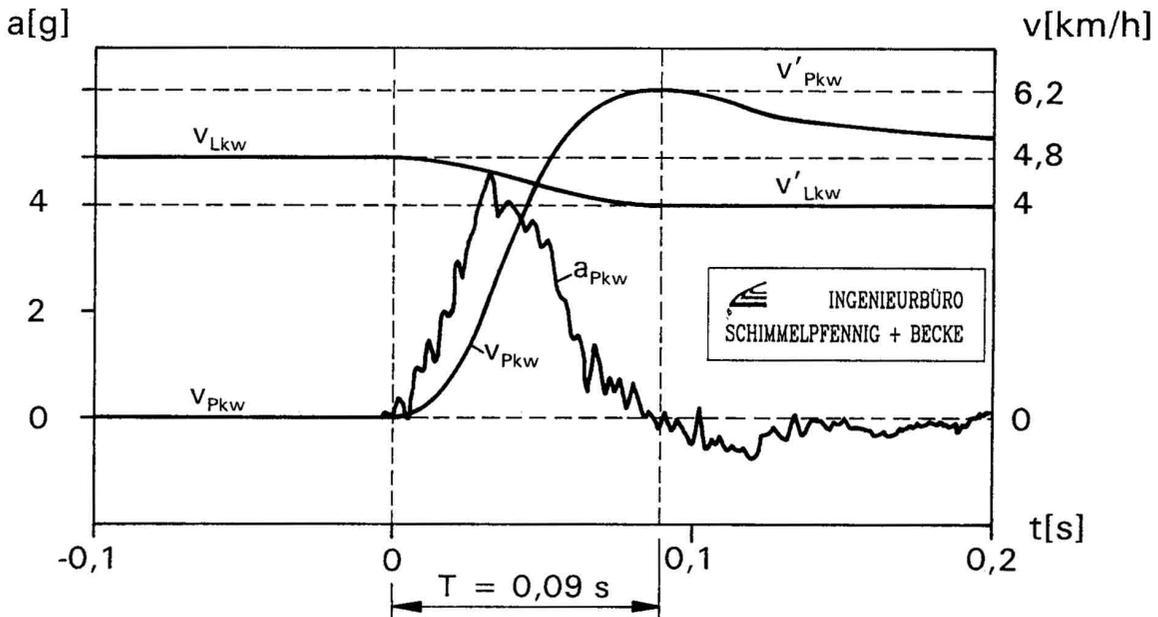
#### 1 Einführung

Die Beurteilung der biomechanischen Insassenbelastung infolge von Heckkollisionen entwickelt sich aus Sicht des Unfallanalytikers von einem Randgebiet zwischen der medizinischen Begutachtung und der technischen Unfallanalyse zu einem festen Bestandteil der Unfallrekonstruktion. Hier gewinnt das technische Belastungsgutachten als eine Grundlage der medizinischen Beurteilung zunehmend an Bedeutung.

Diese Tendenz liegt darin begründet, daß trotz stetiger Weiterentwicklung der passiven Sicherheit »Verletzungen« der Halswirbelsäule in den letzten Jahren kontinuierlich zugenommen haben und so der technische Sachverständige im Rahmen der Begutachtung zunehmend über geeignete technische Kollisionsparameter Aussagen zur biomechanischen Insassenbelastung treffen muß. Hierdurch gewinnt die interdisziplinäre (technisch-medizinische) Beurteilung der Verletzungskausalität im Hinblick auf eine HWS-Beschleunigungsverletzung immer mehr an Bedeutung und führt zur Intensivierung der Diskussion zwischen den jeweiligen Experten auch außerhalb ihres Spezialgebiets.

Im Rahmen einer bereits durchgeführten Grundlagenuntersuchung [1, 2] wurde der Einfluß der Anstoßgeschwindigkeit, des Überdeckungsgrades und der unterschiedlichen Struktursteifigkeit der Fahrzeugkarosserien auf die Geschwindigkeitsänderung des gestoßenen Pkw als Maß für die biomechanische Belastungshöhe des Fahrzeuginsassen experimentell ermittelt. Im Sinne einer Vervollständigung der gewonnenen Erkenntnisse soll in dieser Arbeit der Einfluß des Massenverhältnisses der Unfallpartner auf die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung untersucht werden. Hierzu wurden auf der Crash-Anlage des Ingenieurbüros Schimmelpfennig + Becke 8 Auffahrkollisionen, davon zwei mit Probanden im gestoßenen Fahrzeug, durchgeführt. Hierbei fuhr ein ca. 8 bis 12mal schwerer Lkw auf einen Pkw auf.

Das Ziel dieser Studie besteht darin, den teilelastischen Charakter von Lkw-Pkw-Anstößen auf einem geringen Geschwindigkeitsniveau zu analysieren. Die in der Unfallrekonstruktion gebräuchliche Vorgehensweise bei der Berechnung der Kollisionsparameter bei Unfällen mit stark unterschiedlichen Fahrzeugmassen basiert auf dem Impuls- bzw. Energiesatz, so daß der teilelastische Kollisionscharakter nicht berücksichtigt wird. Diese Methode ist bei Begegnungsunfällen auf einem relativ hohen Differenzgeschwindigkeitsniveau ausreichend genau und daher sinnvoll. Die Anwendung dieser Vereinfachung führt jedoch bei Kleinstkollisionen, beispielsweise im innerstädtischen Verkehr vor einer Rotlicht zeigenden Lichtzeichenanlage, im Hinblick auf die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung des leichteren Kollisionspartners zu einer nicht befriedigenden Lösung, da hier der elastische Rückverformungsanteil und die damit einhergehende Erhöhung der Stoßausgangsgeschwindigkeit nicht mehr zu vernachlässigen ist. Aus diesem Grund soll durch die Analyse der Kollisionsparameter der Crash-Tests der teilelastische Charakter dieser Kleinstkollisionen beschrieben werden.



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

Bild 1 Zeitverlauf der Pkw-Beschleunigung und berechnete Geschwindigkeitsänderung  
Fig. 1 Acceleration and velocity vs. time

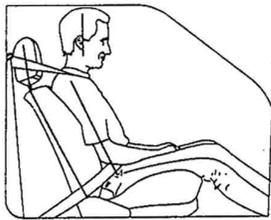


Bild 2 Bildsequenz der Insassenbewegung nach einem Lkw-Heckanstoß

Fig. 2 Kinematic of motion after truck-rear-end-collision



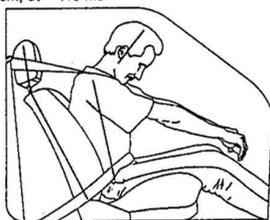
1 Mit Kollisionsbeginn bewegt sich der Fahrzeugsitz auf den ruhenden Körper des Insassen zu.



2 Durch den Kraftschluß zwischen Oberkörper und Rückenlehne wird auch der Oberkörper nach vorne bewegt. Die Relativbewegung zwischen Kopf und Rumpf beginnt.



3 Der maximale Relativwinkel zwischen Kopf und Rumpf des Insassen wird unmittelbar vor dem Kontakt mit der Kopfstütze erreicht. Nach dem Kontakt folgt auch der Kopf der allgemeinen Vorwärtsbewegung.



4 Sekundäres Vorschwingen des Insassen in den Gurt. Diese energiearme Phase der Bewegung ist nicht geeignet, Verletzungen hervorzurufen.

Kollisionsbeginn

ds = 45 cm; dt ≈ 300 ms

Bild 3 Die vier Bewegungsphasen  
Fig. 3 Four phases of motion

## 2 Lkw-Pkw-Kollisionsversuche

Bei allen Versuchen prallte der Lkw vollüberdeckt auf den stehenden Pkw. Hierbei wurde die Anstoßgeschwindigkeit des Lkw ( $v_{Lkw}$ ) mit einer Lichtschranke gemessen. Zur Ermittlung der Stoßausgangsgeschwindigkeit des Pkw ( $v'_{Pkw}$ ), die bei der gewählten Versuchsanordnung mit der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung identisch ist, wurde im Pkw ein Unfalldatenspeicher (UDS der Fa. VDO Kienzle) installiert. Bei 6 Versuchen wurde auch die Lkw-Zellenverzögerung mit Hilfe eines UDS erfaßt. Das **Bild 1** dokumentiert exemplarisch den Zeitverlauf des Pkw-Beschleunigungssignals, den hieraus berechneten Geschwindigkeitsverlauf über der Zeit und die Geschwindigkeit des auffahrenden Lkw unmittelbar vor bzw. nach der Kollision.

Als Crash-Lkw stand ein Klein-Lastwagen älteren Baujahrs mit einem Gewicht von 4,22 t zur Verfügung. Um ein möglichst großes Massenverhältnis zwischen auffahrendem Lkw und gestoßenem Pkw realisieren zu können, wurde ein Fiat Panda durch umfangreiche Demontagen auf ein Gewicht von 515 kg (inkl. Meßtechnik und Proband) bzw. 355 kg (inkl. UDS) »erleichtert«. Durch diesen so präparierten Panda »Light« ließ sich ein Massenverhältnis

$$M = \frac{m_{Lkw}}{m_{Pkw}} \quad (1)$$

von 8,2 bzw. 11,8 erreichen. Die ersten beiden Versuche wurden mit dem Probanden auf dem Fahrersitz des Panda und Anstoßgeschwindigkeiten von 3,3 und 4,8 km/h gefahren. Im Anschluß daran wurden dann noch sechs Crash-Versuche ohne Insassen absolviert, wobei der Lkw je dreimal gegen das Heck und die Front des stehenden Panda prallte. Hierbei wurden Anstoßgeschwindigkeiten im Bereich von 7 bis 20 km/h gefahren.

Exemplarisch wird ein Versuch näher beschrieben:

Bei zwei Versuchen befand sich jeweils ein männlicher, 28jähriger Proband im Pkw, der mit zwei Sensoren am Kopf und an der Brust zur Erfassung der biomechanischen Beschleunigungssignale versehen wurde. Hierzu zeigt das **Bild 2** den mit Hilfe einer Schnellbildkamera aufgezeichneten Bewegungsablauf des Probanden in einer sechsteiligen Bildsequenz. Die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung beträgt 6,2 km/h. Deutlich zu erkennen ist hier die Beeinflussung der Relativbewegung zwischen Kopf und Oberkörper des Probanden durch

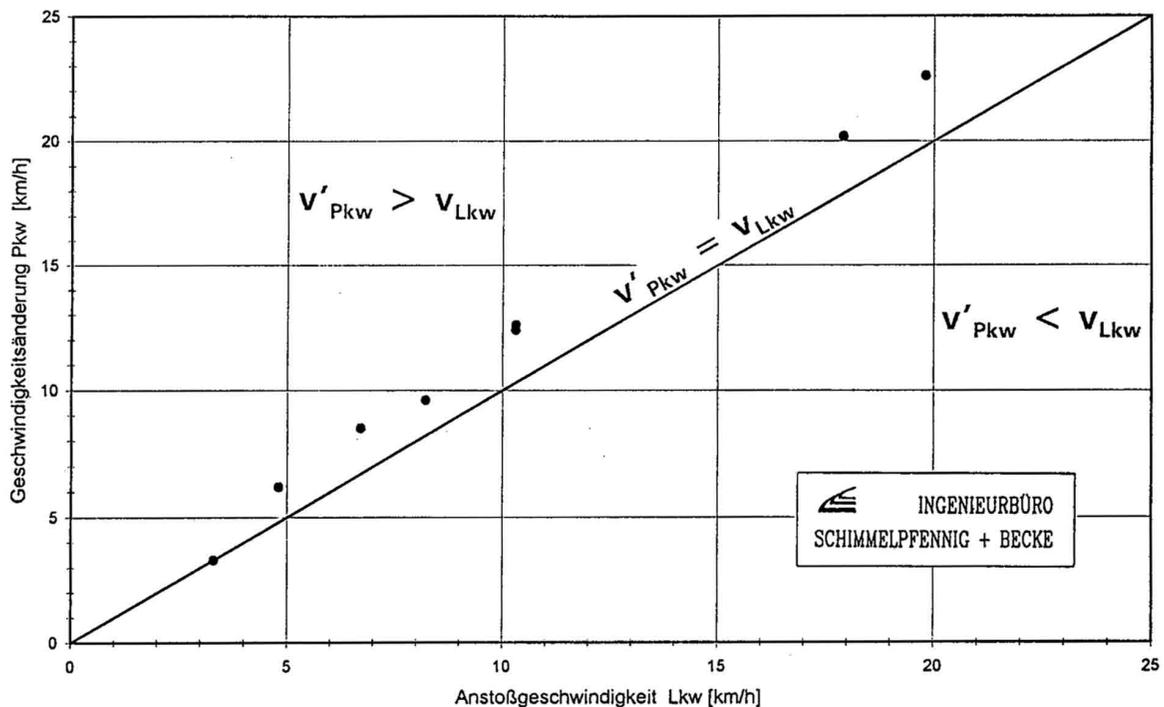


Bild 4 Geschwindigkeitsänderung des Pkw und Anstoßgeschwindigkeit des Lkw  
Fig. 4 Change of car-velocity vs. truck-crash-velocity

INGENIEURBÜRO  
SCHIMMELPFENNIG + BECKE

die konstruktionsbedingt viel zu tief angeordnete Kopfstütze des Pkw. Die Oberkante der Kopfstütze befindet sich unterhalb des Kopfschwerpunktes, wodurch beim Auftreffen der Kopfstütze auf den »Nackenbereich« des Insassen der sich einstellende Relativwinkel zwischen Kopf und Oberkörper noch vergrößert statt begrenzt wird. Trotz dieser ungünstigen Sitz- und Kopfstützenkonstruktion ist der resultierende Bewegungsablauf jedoch als harmlos zu bezeichnen.

Zur besseren Veranschaulichung sind in **Bild 3** die vier Bewegungsphasen eines Pkw-Insassen beim Heckaufprall zusammengefaßt erläutert. Da die Analyse des Bewegungsablaufes im Rahmen dieser Untersuchung keine neuen Erkenntnisse lieferte, soll hier nicht näher auf die Insassenkinematik eingegangen und insoweit auf unsere frühere Untersuchung [1, 2] verwiesen werden.

### 3 Ergebnisse und Diskussion

Die mittlere Stoßdauer  $T$  aller Kollisionen beträgt 0,09 s; sämtliche Stoßzeiten liegen in einem Bereich von 0,07 s bis 0,11 s. Damit liegt die Stoßzeit nur geringfügig unterhalb der bei den Pkw-Pkw-Kollisionen festgestellten von 0,1 s [1, 2]. Dieses Teilergebnis läßt sich durch den vollüberdeckten Kollisionstyp und das verformungssteife Verhalten der Lkw-Front begründen und entspricht somit den Voraussagen des kollisionsmechanischen Ersatzmodells [3, 4] von zwei mit Federn besetzten Massen, wonach die Stoßzeit mit zunehmender Federhärte sinkt.

**Bild 4** zeigt den Zusammenhang zwischen der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung des Pkw (hier gleich der Stoßausgangsgeschwindigkeit) und der Anstoßgeschwindigkeit des Lkw. Hier wird der Einfluß des Massenverhältnisses deutlich: Während die Geschwindigkeitsänderung bei Kollisionspartnern gleicher Masse nur 50% (Teilüberdeckung) bis 65% (Vollüberdeckung) der Anstoßgeschwindigkeit beträgt [2], so ist sie nun mindestens genauso hoch wie die Anstoßgeschwindigkeit des Lkw und erreicht einen Spitzenwert von 130%. Das Ergebnis entspricht zwar tendenziell den Erwartungen aus den Berechnungen einer teilelastischen Kollision mit Hilfe von Impuls- und Energiesatz, ist jedoch in bezug auf die in möglichst engen Grenzen zu bestimmende Insassenbelastung von großem Interesse. Im Gegensatz zur »plastischen« Betrachtungsweise von Fahrzeugkollisionen bei Beteiligung stark unterschiedlicher Massen ist es bei der Analyse von sogenannten Bagatellanstößen zur Ermittlung der Insassenbelastung notwendig, den teilelastischen Charakter zu berücksichtigen, da ansonsten die Obergrenze der biomechanischen Belastung nicht ermittelt wird.

Im folgenden soll daher der Einfluß der Teilelastizität beschrieben werden. Unter Berücksichtigung der Tatsache, daß der Pkw vor dem Anstoß stand, ergeben sich formal einfache Zusammenhänge. Unter Einbeziehung der Newtonschen Stoßziffer  $k$  ergibt sich die Geschwindigkeitsänderung des Pkw zu

$$\Delta v_{Pkw} = \frac{1+k}{2} \frac{2m_{Lkw}}{m_{Lkw} + m_{Pkw}} \cdot v_{Lkw} \quad (2)$$

Führt man neben dem Massenverhältnis  $M$  (Gl. 1) noch das Geschwindigkeitsverhältnis

$$G = \frac{\Delta v_{Pkw}}{v_{Lkw}} \quad (3)$$

ein, so ergibt sich der Zusammenhang

$$G = \frac{1+k}{2} \frac{2M}{M+1} \quad (4)$$

wobei der erste Term neben den Spezialfällen  $k=0$  (plastische Kollision) und  $k=1$  (elastische Kollision) auch die teilelastische Kollision ( $0 < k < 1$ ) und der zweite Term den Einfluß des Massenverhältnisses beschreibt.

Die sich hieraus ergebenden Zusammenhänge veranschaulicht das **Bild 5**. In diesem Diagramm ist das Geschwindigkeitsverhältnis  $G$  in theoretisch mögliche Intervalle  $G=0,5$  ( $M=1, k=0$ ) bis  $G=2$  ( $M=\infty, k=1$ ) über das Massenverhältnis 1 bis 36 aufgetragen. Der gewählte Bereich des Massenverhältnisses beinhaltet somit Kollisionen gleich schwerer Kollisionspartner bis hin zu einem Anstoß eines »36-Tonner« gegen einen 1000 kg schweren Pkw. Die schwarz durchgezeichneten »Symbole« kennzeichnen die 8 Kollisionsversuche bei zwei unterschiedlichen Massenverhältnissen. (Bei der praktischen Anwendung des Diagramms ist natürlich wieder der Einfluß vom Überdeckungsgrad und von der Struktursteifigkeit der beteiligten Fahrzeugpartien auf den Kollisionscharakter zu berücksichtigen.)

Der mittlere  $k$ -Faktor der Versuche ergab sich für den gefahrenen Anstoßgeschwindigkeitsbereich von 3 bis 20 km/h zu 0,29. Dabei zeigte sich erwartungsgemäß, daß bei relativ hohen Anstoßgeschwindigkeiten von knapp 20 km/h der  $k$ -Faktor auf ca. 0,2 absinkt. Somit gilt gerade für Kollisionen mit stark unterschiedlichen Massen, daß sich die Beschreibung der teilelastischen Kollision durch Angabe einer definitionsgemäß konstanten Newtonschen Stoßziffer nur für ein sehr niedriges Differenzgeschwindigkeitsniveau eignet, da sie einen proportionalen Anstieg des elastischen Anteils mit zunehmender Differenzge-

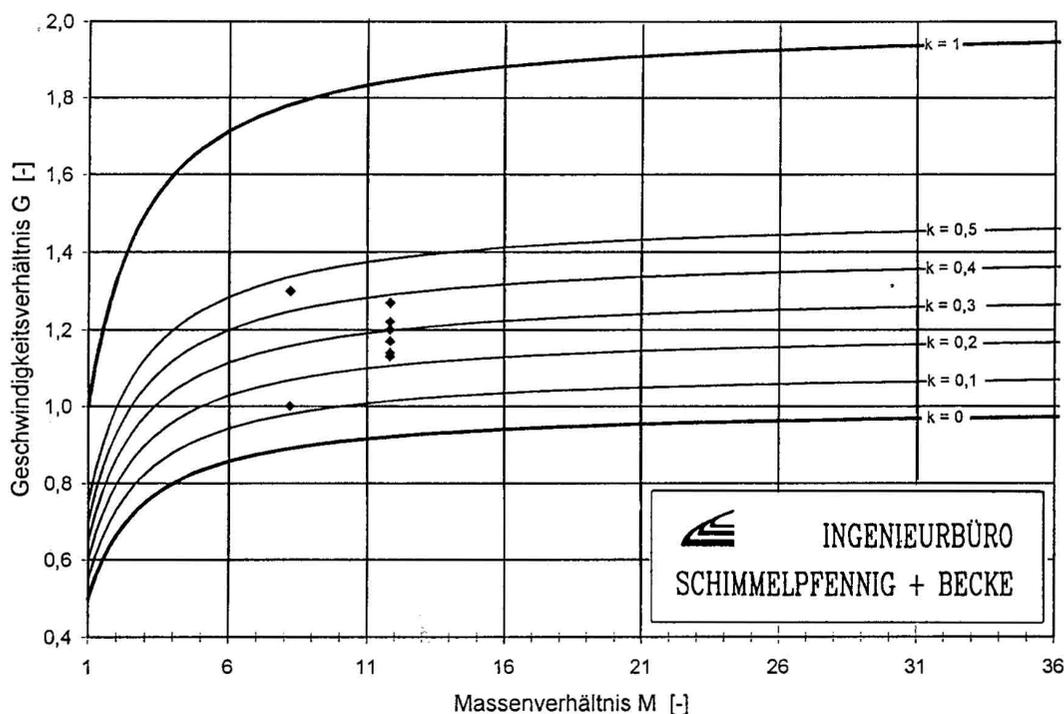


Bild 5 Geschwindigkeitsverhältnis und Massenverhältnis von Pkw und Lkw  
Fig. 5 Velocity and mass proportion

schwindigkeit beinhaltet. Im Gegensatz dazu wird in Anlehnung an [5] durch Verwendung der Trennungsgeschwindigkeit  $\Delta v'$  nur ein konstanter elastischer Anteil berücksichtigt, wodurch sich Kollisionen mit großem Massenverhältnis nicht nur bei niedrigen, sondern auch bei hohen Differenzgeschwindigkeiten charakterisieren lassen werden. Die mittlere Trennungsgeschwindigkeit betrug hier 2,8 km/h. Bei einem 18- bzw. 20 km/h-Lkw-Anstoß betrug sie 4 bzw. 4,7 km/h.

#### 4 Erkenntnisse zur Beurteilung der Insassenbelastung

Das vorrangige Ziel der vorliegenden Studie besteht darin, anhand einer praxisbezogenen Versuchsreihe genauere Kenntnisse über die Kollisionsparameter bei alltäglichen Lkw-Pkw-Auffahrkollisionen auf vergleichsweise geringem Geschwindigkeitsniveau zu erlangen. Im Hinblick auf die biomechanische Belastbarkeit der menschlichen HWS beim Heckanprall hat sich mittlerweile die Geschwindigkeitsänderung als technischer Kollisionsparameter zur Beurteilung der Verletzungskausalität etabliert [6, 7, 8, 9]. Geschwindigkeitsänderungen bis zu etwa 10 km/h gelten als allgemein tolerierbar. In Verbindung mit eigenen Untersuchungen zur Belastbarkeit der HWS bei Heckkollisionen können unter Rückgriff auf Messungen im Autoskooter auch Belastbarkeitsgrenzen von bis zu 15 km/h diskutiert werden. Hierzu ist dann jedoch immer die interdisziplinäre Begutachtungsform notwendig.

Da diese Belastbarkeitsgrenzen auf einem für Verhältnisse der Unfallanalytik sehr geringen, eng gesteckten Geschwindigkeitsniveau liegen, sind weitere Untersuchungen vom Einfluß des Massenverhältnisses und des teilelastischen Charakters der Kollision auf erreichbare Geschwindigkeitsänderungen erforderlich, zumal in der gängigen Literatur Lkw-Pkw-Versuche nur eine untergeordnete Rolle spielen und sich zudem auf Analysen der Kompatibilität auf höherem Geschwindigkeitsniveau beschränken.

Für die Ermittlung der Geschwindigkeitsänderung im Rahmen des technischen Belastungsgutachtens bleibt somit festzuhalten, daß neben einer geeigneten Toleranzwahl bei der Bestimmung der Differenzgeschwindigkeit auch das teilelastische Kollisionsverhalten bei der kollisionsmechanischen Berechnung Berücksichtigung finden muß. Die Crash-Tests haben gezeigt, daß bei Anstoßgeschwindigkeiten von um 10 km/h und einem Massenverhältnis  $M$  von ca. 10 der Pkw aus dem Stillstand auf eine Geschwindigkeit von um 13 km/h beschleunigt werden kann.

#### Literaturnachweis

- [1] Meyer S.: Experimentelle Untersuchung des Zusammenhangs zwischen technischen Kollisionsparametern und der Bewegungskinematik von Insassen im Hinblick auf leichte HWS-Schleudertraumen. Diplomarbeit am Institut für Kraftfahrwesen der Universität Hannover 1993
- [2] Meyer S., Hugemann W., Weber M.: Zur Belastung der Halswirbelsäule durch Auffahrkollisionen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 32 (1994), S. 15 bis 21 und S. 187 bis 199
- [3] MacMillian R.-H.: Dynamics for Vehicle Collisions. Proc. of the International Associations for Vehicle Design. Special Publication SP5. 1983, Interscience Enterprises Ltd
- [4] Rau H.: Rekonstruktion von Fahrzeugkollisionen mit Hilfe von Bewegungsgleichungen. Dissertationsschrift Fachbereich Verkehrswesen. TU Berlin 1975
- [5] Hugemann W.: Die eindimensionale Kollision als dreidimensionale Abbildung. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 30 (1991), S. 103 – 107 u. S. 135 – 137
- [6] Deutscher C.: Bewegungsablauf von Fahrzeuginsassen beim Heckaufprall, Eurotax (International) AG, CH-8807 Freienbach, 1994
- [7] Danner M.: Halswirbelsäule (HWS)-Verletzungen bei Pkw-Insassen und daraus resultierende Versuche im Allianz-Centrum für Technik (Versuchsdurchführung und Trends). Forschung und Praxis der Begutachtung Heft 30. Gesellschaft der Gutachter-Ärzte Österreichs, Wien 1987
- [8] Szabo T. J., Welcher J. B., Anderson R. D., Rice M. M., Ward J. A., Paulo L. R., Carpenter N. J. (1994): Human Occupant Kinematic Response to low Speed Rearend Impacts. SAE Paper 940532. Publ. by Society of Automotive Engineers, Inc.; Warrendale, PA/USA
- [9] Steffan H., Geigl B.: Zur Problematik von HWS-Verletzungen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 34 (1996), S. 35 bis 39 ■