

Stefan Meyer*, Wolfgang Hugemann**, Michael Weber***

Zur Belastung der Halswirbelsäule

durch Auffahrunfälle – Teil 2

Vertiefende kollisionsmechanische

Betrachtungen

Fortsetzung aus Heft 1/1994

Kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung

Die Analyse der Bewegungskinetik von Insassen während der durchgeführten Fahrzeug/Fahrzeug-Kollisionen hat gezeigt, daß die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung des Fahrzeugs der aussagekräftigste globale Parameter zur Beurteilung der Verletzungsrelevanz im Hinblick auf leichte HWS-Schleudertraumata ist.

Eine gutachterliche Beantwortung der Frage, ob ein Unfallgeschehen und eine Verletzung an der Halswirbelsäule im ursächlichen Zusammenhang stehen, kann nur auf Grundlage einer bekannten Geschwindigkeitsänderung des betroffenen Fahrzeugs erfolgen. Die Bestimmung dieses Parameters ist für den Unfallanalytiker durch eine Auswertung des Beschädigungsumfanges der beteiligten Fahrzeuge, die Ermittlung des Überdeckungsgrades der Kollision, sowie eine Bewertung des Einflusses der Struktursteifigkeit der beteiligten Karosserieteile möglich.

Um den forensisch tätigen Sachverständigen unmittelbar anwendbare Entscheidungshilfen an die Hand zu geben, beinhaltet dieser Teil der Veröffentlichung vertiefende kollisionsmechanische Betrachtungen. Diese haben das Ziel, die Ergebnisse, welche aus der Analyse der Kollisionsparameter der Einzelexperimente folgen, so aufzuarbeiten, daß sie auch auf leicht abweichende Kollisionssituationen übertragbar werden.

7.1 Kollisions- und Stoßausgangsgeschwindigkeiten

In vielen grundlegenden Darstellungen der Kollisionsmechanik [20, 21] wird zur Berechnung der Stoßdauer ein einfaches Ersatzmodell verwendet, das aus zwei mit Federn besetzten Massen besteht. Als Stoßzeit T wird in diesem Ersatzmodell die Zeitspanne bis zur maximalen Kompression der Federn angesetzt. Es ergibt sich

$$T = \frac{\pi}{2} \sqrt{\frac{m^*}{c^*}} \quad (2)$$

in der m^* die reduzierte Masse und c^* die analog dazu definierte reduzierte Federsteifigkeit bezeichnet. Dem Ersatzmodell zufolge müßte die Stoßzeit mit zunehmender Federhärte c^* sinken. Übertragen auf die

nachgestellten Auffahrunfälle bedeutet dies, daß die Stoßzeit, bei Beteiligung von Fahrzeugen mit nahezu gleicher Struktursteifigkeit und zunehmendem Überdeckungsgrad, theoretisch sinken müßte. Interessanterweise läßt sich dieser Effekt bei der Auswertung der Kollisionsversuche im Gegensatz zu den Voraussagen des Ersatzmodells nicht feststellen.

Im Vergleich zu den Skooterkollisionen war bei den Pkw/Pkw-Anstößen die Messung der Anstoßgeschwindigkeit v_1 problemlos möglich. Bild 16 zeigt den Zusammenhang zwischen der Stoßausgangsgeschwindigkeit des gestoßenen Fahrzeugs und der Anstoßgeschwindigkeit. Um den unterschiedlichen Massen m_1 und m_2 der Stoßpartner Rechnung tragen zu können, wurde eine massenbewertete Aufprallgeschwindigkeit

$$\bar{v}_1 = \frac{2m_1}{m_1 + m_2} v_1 \quad (3)$$

definiert. Unter Verwendung der massenbewerteten Aufprallgeschwindigkeit ergeben sich formal einfache Zusammenhänge. Bezieht man die Newtonsche Stoßziffer k mit ein, ergibt sich

$$v_2' = \frac{1+k}{2} \bar{v}_1 \quad (4)$$

Die Gl. (4) umfaßt mit den Spezialfällen $k = 0$ und $k = 1$ die plastische und elastische Kollision. Will man in Anlehnung an [22] die teilelastische Kollision durch die Angabe der Trennungsgeschwindigkeit $\Delta v'$ der Fahrzeuge charakterisieren, so gelangt man zu der Beziehung

$$v_2' = \frac{1}{2} \bar{v}_1 + \frac{m_1}{m_1 + m_2} \Delta v' \quad (5)$$

die sich für den Fall annähernd gleicher Massen zu

$$v_2' \approx \frac{1}{2} \bar{v}_1 + \frac{1}{2} \Delta v' \quad (6)$$

vereinfachen läßt.

Teilelastische Kollisionen mit gleichem Stoßfaktor befinden sich also gem. Gl. (4) auf derselben Ursprungsgeraden. Kollisionen mit gleicher Trennungsgeschwindigkeit der Fahrzeuge im Anschluß an die Kollision liegen gemäß Gl. (5) parallel zu der den plastischen Stoß charakterisierenden Geraden, wobei der Schnittpunkt mit der y -Achse etwa der halben Trennungsgeschwindigkeit der Fahrzeuge entspricht.

Unter Rückgriff auf diese Zusammenhänge läßt die Darstellung in Bild 16 nunmehr systematische Zusammenhänge erkennen. Es wird deutlich, daß die als volle Punkte eingezeichneten Kollisionen voller Überdeckung normalerweise elastischer verlaufen als die mit Kreisen gekennzeichneten mit Drittel-Überdeckung. Eine Regressionsrechnung ergibt für die vollüberdeckten Kollisionen eine mittlere Stoßziffer von 0,38, bei den teilüberdeckten Kollisionen eine solche von 0,16. Die mittlere Trennungsgeschwindigkeit läßt sich ebenfalls mit Regressionsrechnung für die teilüberdeckten Kollisionen zu 2,0 km/h und für die vollüberdeckten Kollisionen zu 4,8 km/h ermitteln.

Anschaulich erkennt man, daß für diesen Bereich der Differenzgeschwindigkeiten sowohl die Charakterisierung durch die Stoßziffer k als auch die durch die Angabe der Trennungsgeschwindigkeit $\Delta v'$ eine gleich gute Beschreibung der teilelastischen Kollisionen liefert. Die für beide Beschreibungsvarianten nahezu gleich großen Residuen aus der Regressionsrechnung bestätigen die anschaulich festgestellte gleich gute Charakterisierung. Betrachtet man jedoch, abweichend von dem hier untersuchten Differenzgeschwindigkeitsbereich von ca. 8 km/h bis 18 km/h, das gesamte Spektrum möglicher Differenzgeschwindigkeiten ist der inhaltliche Unterschied der beiden dargestellten Charakterisierungsalternativen zu beachten. Zur Beschreibung einer teilelastischen Kollision im niedrigen Differenzgeschwindigkeitsniveau ist die Verwendung der Newton'schen Stoßziffer vorteilhaft, da sie einen proportionalen Anstieg des elastischen Anteils mit zunehmender Differenzgeschwindigkeit beinhaltet. Will man hingegen teilelastische Kollisionen

*Dipl.-Ing. Stefan Meyer

**Dipl.-Ing. Wolfgang Hugemann

***Dipl.-Ing. Michael Weber

alles Mitarbeiter im Ingenieurbüro Schimmelpfennig + Becke, Münsterstraße 101, 48155 Münster-Wolbeck

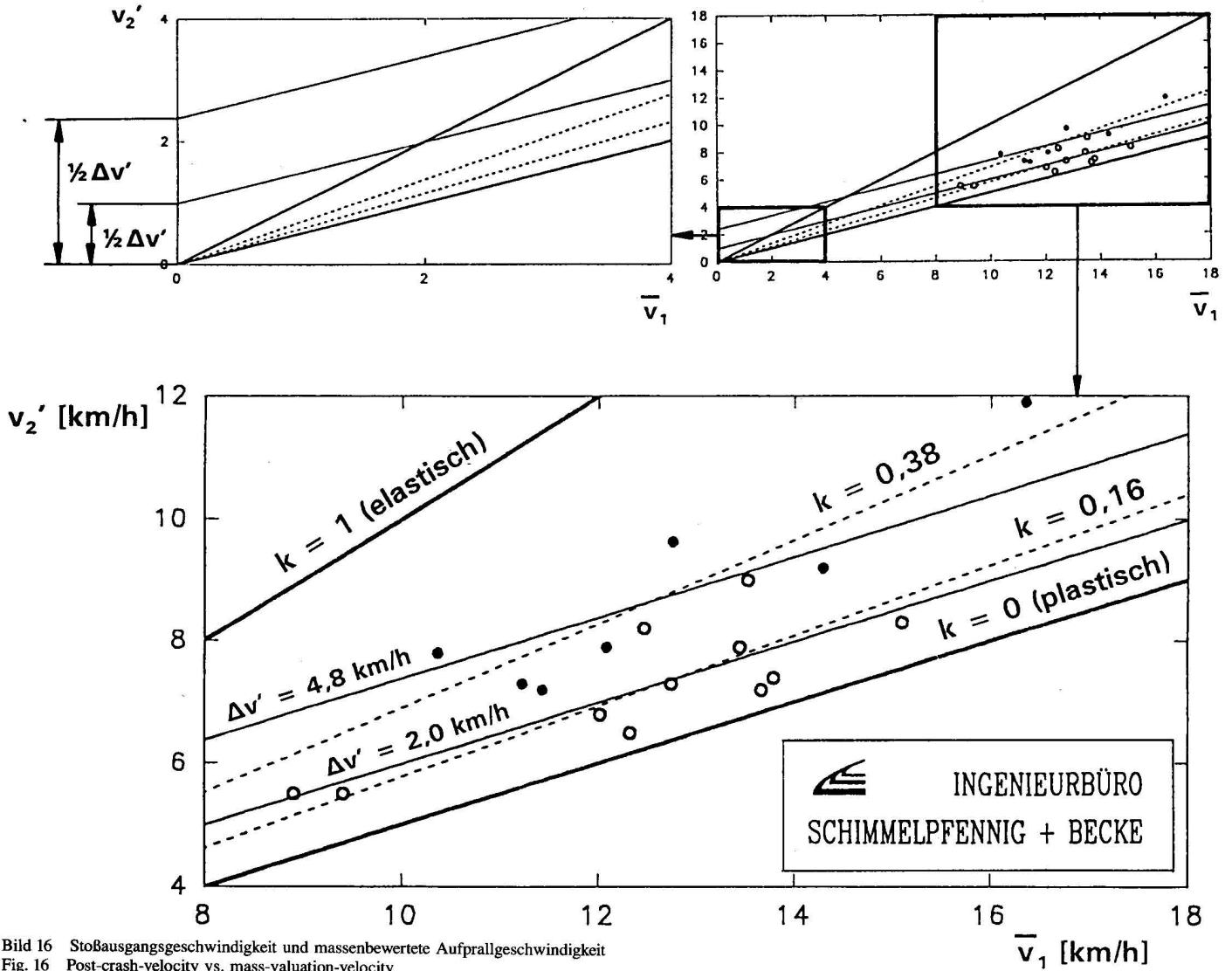


Bild 16 Stoßausgangsgeschwindigkeit und massenbewertete Aufprallgeschwindigkeit
Fig. 16 Post-crash-velocity vs. mass-valuation-velocity

mit vergleichsweise hoher Differenzgeschwindigkeit charakterisieren, so gelangt man unter Verwendung der Trennungsgeschwindigkeit zu realitätsnahen Ergebnissen, da sie nur einen konstanten elastischen Anteil berücksichtigt.

Der beobachtete Effekt der Abhängigkeit des Stoßfaktors k und der Trennungsgeschwindigkeit $\Delta v'$ vom Überdeckungsgrad der Kollision ist technisch plausibel. Während der Kompressionsphase werden die beteiligten Fahrzeugstrukturen zunächst elastisch und dann, nach Überschreiten der max. Zugspannungen im Blech, plastisch verformt. Die Trennungsgeschwindigkeit der Fahrzeuge im Anschluß an die Kollision beruht hauptsächlich auf der elastischen Rückverformung des Materials während der Restitutionsphase. Bei teilüberdeckten Kollisionen sind kleinflächige Fahrzeugstrukturen am Kraftaustausch beteiligt. Die zulässigen Zugspannungen werden verhältnismäßig schnell überschritten, so daß ein Großteil der Verformung plastisch stattfindet. Die während der Restitutionsphase freigesetzte, in elastischer Verformung gespeicherte Energie, beträgt somit nur einen Bruchteil der insgesamt umgesetzten Energiemenge. Sind hingegen großflächigere Fahrzeugstrukturen an der Kollision beteiligt, so werden die zulässigen Zugspannungen erst später überschritten, so daß ein höherer Energieanteil in der Restitutionsphase wieder in kinetische Energie rückverwandelt werden kann.

In der Konsequenz ist die Geschwindigkeitsänderung im gestoßenen Fahrzeug beim vollüberdeckten Stoß bei gleicher Anstoßgeschwindigkeit höher. Auf den in Bild 16 eingezeichneten Geraden gleicher Stoßziffer beträgt die Geschwindigkeitsänderung im gestoßenen Fahrzeug bei teilüberdeckten Stößen 58% und bei vollüberdeckten Stößen 69% der Anstoßgeschwindigkeit. Dieser Erkenntnis kommt bei der Beurteilung der Geschwindigkeitsänderung als aussagekräftigster, ver-

letzungsrelevanter Parameter eine große Bedeutung zu. Bei Kollisionen identischer Differenzgeschwindigkeit, aber unterschiedlicher Überdeckung, ist die Insassenbelastung bei Teilüberdeckung geringer als bei Vollüberdeckung.

Anders als bei den Scooter-Kollisionen, die bedingt durch das definierte Verformungsverhalten des luftgefüllten Prallrings weitestgehend elastisch ablaufen, fällt bei den Pkw-Kollisionen das Maximum der Beschleunigung nicht an das Ende der Kompressionsphase. Da der Impulssatz auch während der Kollision gültig ist, bleibt Gl. (5) auch während der Kollisionsphase gültig. Da v_2' aus dem Zeitintegral der Beschleunigung ermittelt werden kann, ist es möglich, die Trennungsgeschwindigkeit der Fahrzeuge gem. Gl. (5) zu berechnen. Bild 17 zeigt einen nachgefilterten Beschleunigungsverlauf zusammen mit der daraus errechneten Geschwindigkeitsänderung der Fahrzeuge. Wie bei einer annähernd plastischen Kollision nicht anders zu erwarten, ist die Kompressionsphase erst kurz vor Ende des Stoßes abgeschlossen. Auch die Beobachtung, daß der maximale Kraftaustausch deutlich vor dem Ende der Kompressionsphase stattfindet, steht im Widerspruch zu einfachen Stoßmodellen, die von einem linearen Anstieg der Kraft mit zunehmender Deformation ausgehen.

7.2 Charakterisierung der Beschleunigungsverläufe

Wesentliche Erkenntnisse vorstehender Untersuchungen basieren auf den während der Autoskooter- und Auffahrkollisionen aufgezeichneten Beschleunigungssignalen der Scooter bzw. Fahrgastzellen. Damit die bereits gezeigte anschauliche Vergleichbarkeit dieser Signale (vgl. Bild 3 und Bild 7, Teil 1) verdeutlicht werden kann, ist eine genaue Betrachtung ihres Zeitverlaufes notwendig.

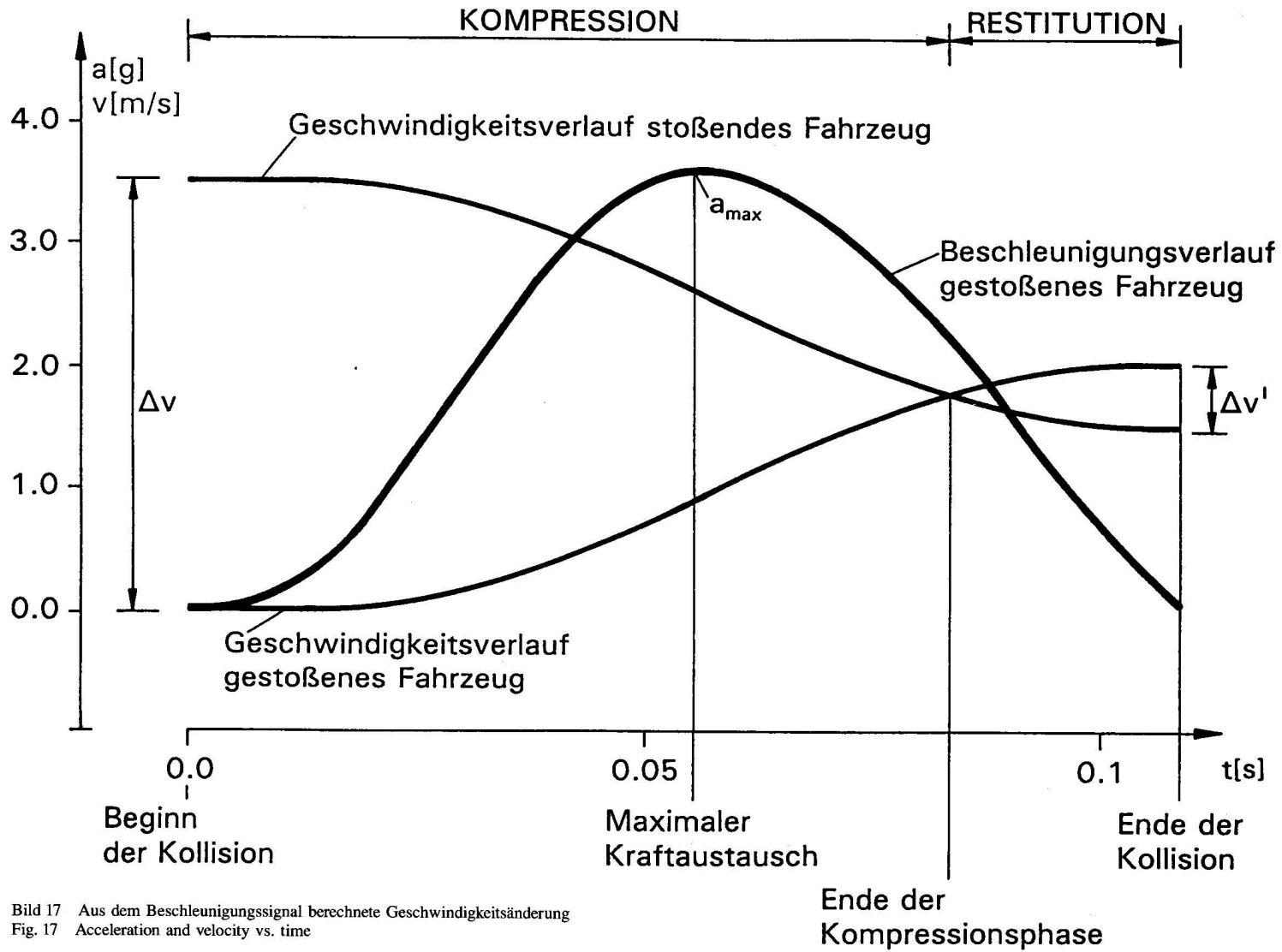


Bild 17 Aus dem Beschleunigungssignal berechnete Geschwindigkeitsänderung
Fig. 17 Acceleration and velocity vs. time

Um die zeitlichen Verläufe der gemessenen Skooter- bzw. Fahrgastzellen-Beschleunigungen charakterisieren zu können, wurde gem. Bild 18 das Verhältnis α zwischen Maximalbeschleunigung a_{max} und mittlerer Beschleunigung \bar{a} sowie die relative zeitliche Lage τ dieses Maximums im Verhältnis zur Stoßdauer als dimensionslose Kenngröße definiert

$$\alpha = \frac{a_{max}}{\bar{a}} \quad (7)$$

$$\tau = \frac{t_{max}}{T} \quad (8)$$

In Bild 19 sind diese dimensionslosen Verhältniszahlen für sämtliche Kollisionsereignisse während der Autoskooter-Meßfahrten gegeneinander aufgetragen. Die Meßpunkte gruppieren sich sehr dicht um das im Punkt $\tau = 0,49$, $\bar{\alpha} = 1,81$ liegende Zentrum. Der Parameter τ charakterisiert die Symmetrie des Beschleunigungsverlaufes in bezug auf Kompressions- und Restitutionsphase. Wie bei stark elastischen Kollisionen nicht anders zu erwarten, wird der Maximalwert der Beschleunigung etwa nach der halben Stoßzeit erreicht. Der Parameter α charakterisiert die »Balligkeit« des Beschleunigungsverlaufes. Niedrige Werte stehen für rundliche Verläufe im Bereich um das Maximum, hohe Werte für eine vergleichsweise kurze Phase hoher Beschleunigung. Bild 19 zeigt damit die Ähnlichkeit der Beschleunigungsverläufe.

In Analogie zu den Skooterkollisionen zeigt Bild 20 die charakteristischen Größen der Beschleunigung im gestoßenen Fahrzeug bei den Pkw/Pkw-Auffahrkollisionen. Der Vergleich mit den Skooter-Parametern

zeigt, daß die Streuung um die Mittellage größer ausfällt, jedoch die Lage des durch $\bar{\alpha} = 1,71$ und $\bar{\tau} = 0,53$ bestimmten Zentrums der Meßpunkte, den Werten der Autoskooter-Versuche sehr ähnlich ist. Eine gute Vergleichbarkeit von Autoskooter-Stößen und Pkw-Kollisionen ist durch die ähnliche Charakteristik ihrer Beschleunigungsverläufe gegeben. Die Tatsache, daß der Mittelwert des Beschleunigungsverhältnisses bei den Fahrzeug/Fahrzeug-Kollisionen kleiner ausfällt als bei den Skooter/Skooter-Kollisionen, entspricht dem erwarteten Ergebnis. Der kleinere Mittelwert steht für einen vergleichsweise rundlichen Verlauf der Beschleunigung im Bereich des Maximums. Dadurch ist die Phase, in der eine Beschleunigung nahe des Maximalwertes auftritt, geringfügig länger, was wiederum auf einen höheren Anteil plastischer Verformungen während der Auffahrkollisionen zurückzuführen ist.

8 Folgerungen und Ausblick

Im Rahmen von Meßfahrten auf einer Autoskooter-Anlage wurden die Autoskooter-Fahrgastzellen-Beschleunigungen bei 70 Kollisionsereignissen erfaßt. Durch eine kollisionsmechanische Auswertung der aufgezeichneten Beschleunigungssignale konnten abgesicherte Erkenntnisse zu tolerierbaren Belastungen der Halswirbelsäule abgeleitet werden.

Zur Bestimmung verletzungsrelevanter Kenngrößen wurden 14 Auffahrkollisionen mit Beteiligung von Probanden auf dem Beifahrersitz des gestoßenen Versuchsfahrzeugs nachgestellt. Die Analyse der Insassenbewegung hat gezeigt:

- Der maximale Verdrehwinkel zwischen Kopf und Oberkörper ist in der Hauptsache von der geometrischen Gestaltung des Fahrzeugsitzes abhängig. Bei korrekt eingestellter Rückenlehnenneigung und Kopfstütze ist er, zumindest bei Anstößen im unteren Geschwin-

Bild 18 Charakteristische Größen eines Beschleunigungsverlaufes
Fig. 18 Characteristic sizes from a plot of acceleration

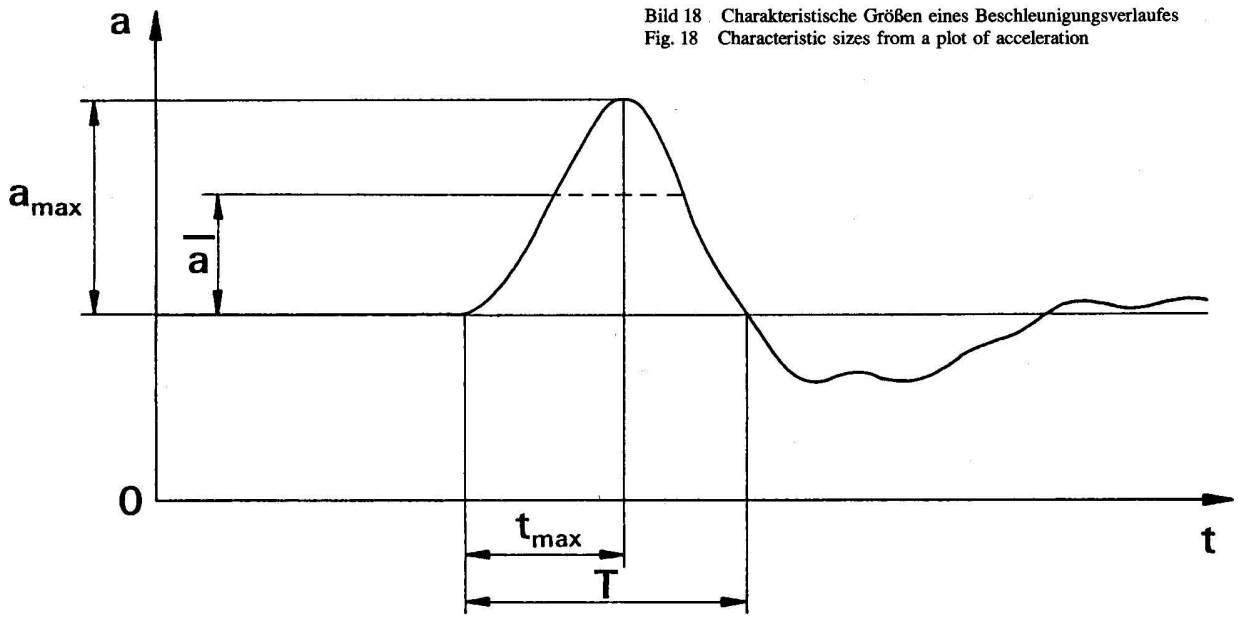


Bild 19 Beschleunigungsverhältnis und zeitliche Lage der Skooterkollisionen
Fig. 19 Proportion of acceleration vs. temporal position from dodgem collisions

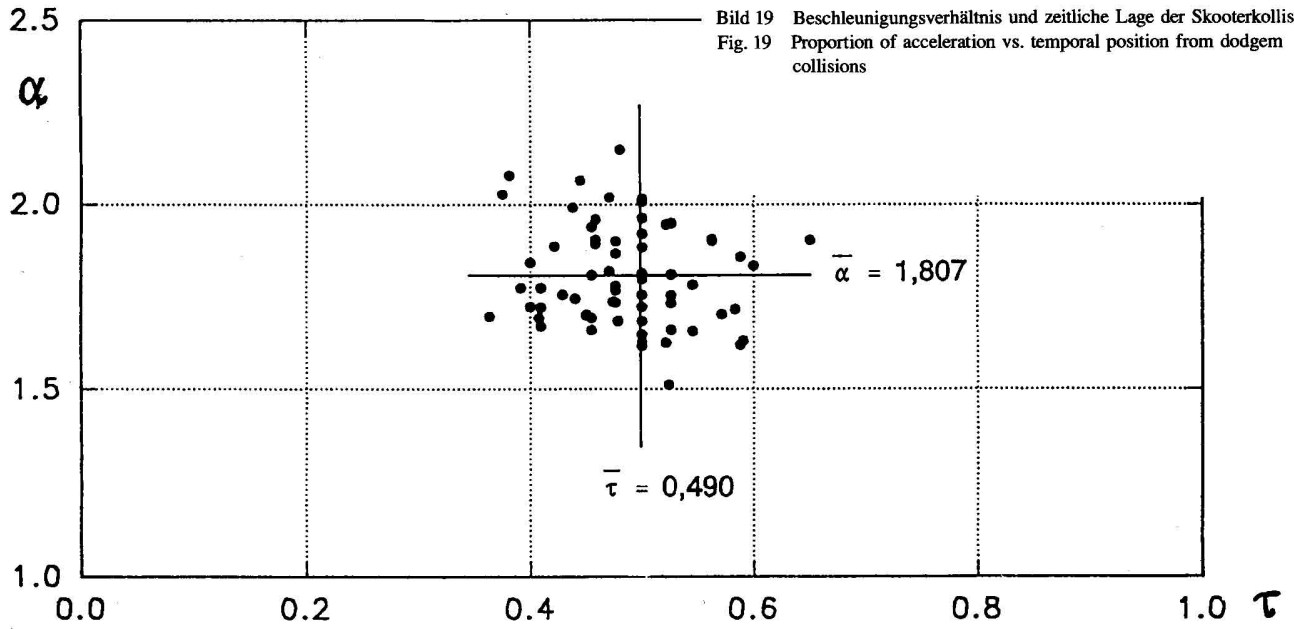
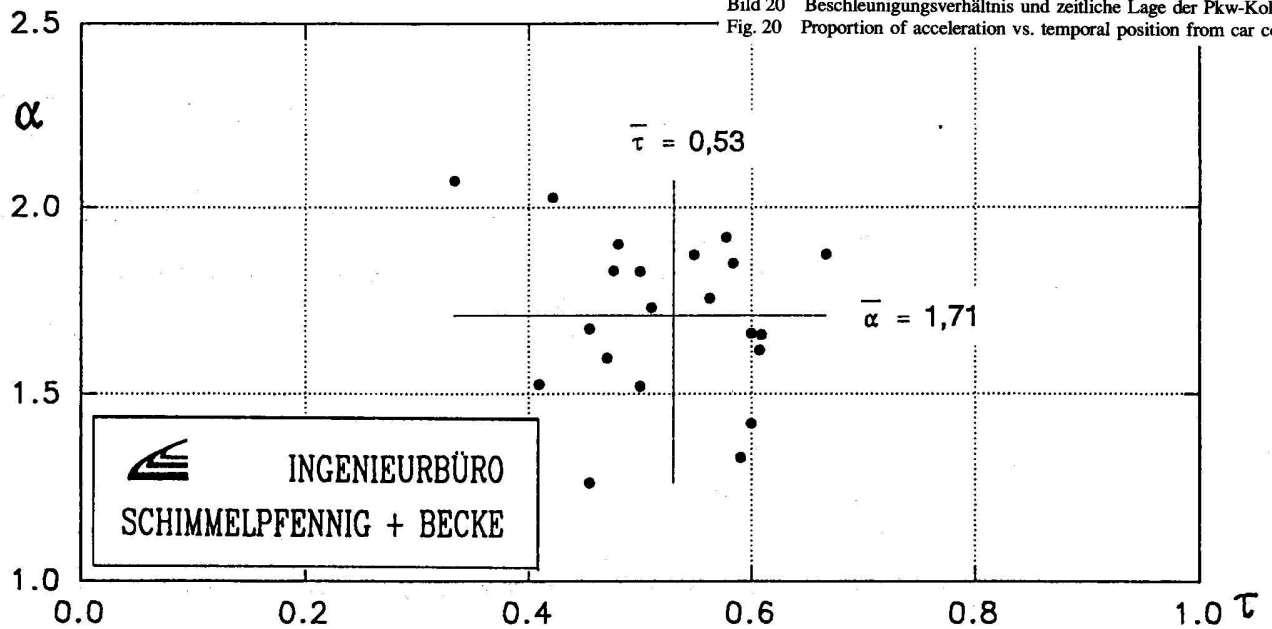



Bild 20 Beschleunigungsverhältnis und zeitliche Lage der Pkw-Kollisionen
Fig. 20 Proportion of acceleration vs. temporal position from car collisions



 **INGENIEURBÜRO
SCHIMMELPFENNIG + BECKE**

digkeitsbereich, unabhängig von der Geschwindigkeitsänderung des gestoßenen Fahrzeugs.

- Die Drehwinkelgeschwindigkeit des Kopfes erreicht auch bei geringen Anstoßgeschwindigkeiten eine beachtliche Größe, so daß bei korrekter geometrischer Sitzgestaltung der verletzungsrelevante Parameter hauptsächlich in der Geschwindigkeit der Relativbewegung zwischen Kopf und Oberkörper bestehen kann.
- Die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung des Fahrzeugs ist der aussagekräftigste globale Parameter zur Beurteilung der Verletzungsrelevanz im Hinblick auf HWS-Schleudertraumata.

Die durchgeführten Versuchsreihen haben gezeigt, daß die HWS bestimmte Belastungen, die bei Auffahrunfällen auftreten, toleriert. Deshalb ist es zur Klärung der Kausalitätsfrage erforderlich, vor Einholung des medizinischen Fachgutachtens eine unfallanalytische Bestimmung des Belastungsniveaus vorzunehmen. Ergeben sich dabei Belastungswerte, bei denen mit großer Wahrscheinlichkeit keine Verletzungen auftreten, stellt sich aus juristischer Sicht die Frage der Verletzungskausalität. Diese Problematik wurde vom 32. Deutschen Verkehrsgerichtstag aufgegriffen und in folgender Empfehlung zusammengefaßt: »Soweit erforderlich, sind die tatsächlichen Grundlagen des Unfallhergangs durch ein unfallanalytisches Gutachten zu klären.«

Die zahlreichen Reaktionen, vor allem aus den verschiedenen Fachgebieten der Medizin, auf den bereits veröffentlichten ersten Teil dieser Arbeit zeigen ein starkes Interesse an dieser unter technischen Gesichtspunkten aufgearbeiteten Thematik. Die erstrebte Anregung für eine engere Kooperation zwischen Medizinern und Technikern im Bereich der Begutachtung von HWS-Verletzungen scheint erfolgt zu sein.

Ausgehend von den diskutierten verletzungsrelevanten Parametern ist es vor weiterführenden Experimenten jedoch Aufgabe der medizinischen Experten, die Verletzungsmorphologie der leichten HWS-Verletzung« genauer zu beschreiben.

Literaturnachweis

- [1] N. N.: Jeder helfe sich selbst. Auto Zeitung, Heft 16, 1993
- [2] Bowman, N. M., Schneider L. W., Lustick L. S., Anderson W. R., Thomas D. J.: Simulation Analysis of Head and Neck Dynamic Response SAE-Paper 841668, 28th Stapp Car Crash Conf. Proc., USA 1984
- [3] Delank H. W.: Das Schleudertrauma der HWS. Eine neurologische Standortssuche. Der Unfallchirurg 91 (1988), S. 381 – 387
- [4] Erdmann H.: Schleuderverletzungen der Halswirbelsäule, Erkennung, Begutachtung. Hippokrates-Verlag, Stuttgart 1973
- [5] Foust D., Chaffin D., Snyder R., Baum J.: Cervical Range of Motion and Dynamic Response and Strength of Cervical Muscles, SAE-Paper 730975, Biomechanics of Impact Injury, (PT-43), USA 1993
- [6] Laubichler W.: Die Problematik einer Begutachtung von Verletzungen der Halswirbelsäule einschließlich cervico-cephalem Beschleunigungstrauma. Der Unfallchirurg 90 (1987), S. 339 – 346
- [7] Ludolph E., Besig K.: Das sogenannte HWS-Schleudertrauma in der Begutachtung für die gesetzliche Unfallversicherung. Unfallversicherung, Dezember 1987
- [8] McConnell W. E., Howard R. P., Guzman H. M., Bomar J. B., Benedict J. V., Smith H. L., Hatsell C. P.: Analysis of Human Test Subject Kinematic Responses to Low Velocity Rear End Impacts; SAE TECHNICAL PAPER SERIES 930889, Warrendale USA 1993
- [9] Missliwetz J., Mortinger H.: Kenntnisse über das sogenannte Schleudertrauma der Halswirbelsäule und mögliche Simulation. Der medizinische Sachverständige 83 (1987), S. 128 – 130

- [10] Nusholtz G. S., Huelke D. E., Lux P., Alem N. M., Montalvo F.: Cervical Spine Injury Mechanismus. SAE-Paper 831616, 27th Stapp Car Crash Conf. Proc. (1983)
- [11] Ritter G.: Unfallneurotische Entwicklungen nach HWS-Verletzungen als Begutachtungsproblem. Unfall- und Sicherheitsforschung Straßenverkehr, Heft 82 (1991)
- [12] Schlegel K. F.: Heckaufprall und Halswirbelsäule. Neue Erkenntnisse und gutachterliche Relevanz. Med. Orth. Techn. 112 (1992), S. 228 – 230
- [13] Scott M. W., McConnell W. E., Guzman H. M., Howard R. P., Bomar J. B., Smith H. L., Benedict J. V., Raddin J. H., Hatsell C. P.: Comparison of Human and ATD Head Kinematics During Low-Speed Rear-End Impacts. SAE TECHNICAL PAPER SERIES 930094, Warrendale, USA 1993
- [14] Svenson, Lövsund, Haland, Larsson: Rear-End Collisions-A Study of the Influence of Backrest Properties on Head-Head-Neck Motion using a New Dummy Neck. SAE TECHNICAL PAPER SERIES 930889, Warrendale, USA 1993
- [15] Viano D.C.: Influence of Seatback Angle on Occupant Dynamics in Simulated Rear-End Impacts. SAE-Paper 922521, Proc. 36th Stapp Car Crash Conf. (1992)
- [16] Walz F.: Unfallrekonstruktion bei HWS-Verletzungen aus biomechanisch-medizinischer Sicht. EVU-Zeitschrift 1/93
- [17] Yoganandan N., Haffner M., Maiman D. J., Nichols H., Pintar F. A., Jentzen J., Weinsel S. J., Larson S. J., Sances Jr. A.: Epidemiology and Injury Biomechanics of Motor Vehicle Related Trauma to the Human Spine. SAE-Paper 892438, 33rd Stapp Car Crash Conf. (1989)
- [18] Danner M.: Halswirbelsäule (HWS)-Verletzungen bei Pkw-Insassen und daraus resultierende Versuche im Allianz-Zentrum für Technik (Versuchsdurchführung und Trends). Forschung und Praxis der Begutachtung, Heft 30. Gesellschaft der Gutachterärzte Österreichs, Wien 1987
- [19] Schmidt G.: Zur Biomechanik des Schleudertraumas der Halswirbelsäule Versicherungsmedizin, Heft 4, 1989
- [20] Macmillan R.-H.: Dynamics for Vehicle Collisions. Proc. of the International Associations for Vehicle Design. Special Publication SP 5, 1983, Inderscience Enterprises Ltd.
- [21] Rau H.: Rekonstruktion von Fahrzeugkollisionen mit Hilfe von Bewegungsgleichungen. Dissertationsschrift Fachbereich Verkehrswesen, TU Berlin 1975
- [22] Hugemann W.: die eindimensionale Kollision als dreidimensionale Abbildung. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 30 (1992), S. 103 – 107 u. S. 135 – 137