

Wolfram Kalthoff*, Stefan Meyer**, Manfred Becke***

Die Insassenbewegung bei leichten Pkw-Heckanstößen

Zusammenfassung

Im Rahmen einer interdisziplinären Freiwilligen-Studie zur Belastung der Halswirbelsäule durch Pkw- und Autoskooter-Anstöße wurde neben zahlreichen kollisionsmechanischen Parametern die Insassenbewegung untersucht. Hierbei wurde mit Hilfe einer Videoanalyse auch die Fahrzeug- und Sitzbewegung aufgezeichnet. Prinzipiell lässt sich der Bewegungsablauf infolge eines Heckanstoßes in eine Primär- und eine Sekundärbewegung unterteilen. Innerhalb der Primärbewegung vollzieht der Insasse eine relativ zum Sitz nach hinten gerichtete Bewegung. In der sich anschließenden Sekundärbewegung bewegt sich der Fahrzeuginsasse relativ zum Fahrzeug nach vorn, bis er durch die Rückhaltewirkung des Sicherheitsgurtes aufgefangen wird. Während der Primärbewegung erfährt die Wirbelsäule zunächst eine Flexion und anschließend eine Extension. Auf Grund der Sekundärbewegung kommt es zu einer Flexionsbewegung der Wirbelsäule, die ebenfalls bei Frontalkollisionen auftritt. Somit ist die aus der Sekundärbewegung resultierende biomechanische Insassenbelastung prinzipiell mit derjenigen einer Frontalkollision zu vergleichen. Die Relativgeschwindigkeit, mit welcher der Insasse sich infolge eines Heckanstoßes innerhalb der Sekundärbewegung im Fahrzeug nach vorn bewegt, kann durch den Reboundfaktor beschrieben werden. Der Vergleich von Pkw- und Skooter-Kollisionen zeigt grundsätzliche Gemeinsamkeiten im Hinblick auf den Bewegungsablauf der Insassen.

Summary

Within an interdisciplinary study with volunteers about the stress of the cervical spine as a result of rear-end collisions the motions of the occupants, the seats and the vehicles were analyzed. Basically it must be distinguished between a primary and a secondary part of the occupant's motion. During the primary motion the occupant moves backwards in the vehicle and in the seat while there is a flexion and then an extension of the spine. In the following secondary phase the motion is forward, until the occupant is stopped by the safety belt. Here the spine makes a flexion like in a frontal crash. Therefore the stress of the spine because of the secondary phase is comparable with the stress of a frontal crash. The relative velocity of the passenger forward in the car because of a rear-impact can be described by the rebound-factor. Bumper-car and car collisions have a lot of fundamental facts of the occupant motion in common.

1 Einführung

Die Thematik der Verletzungsmöglichkeit der Halswirbelsäule infolge von Pkw-Anstößen wurde mittlerweile in zahlreichen Veröffentlichungen behandelt. Hierbei wurden im Wesentlichen kollisionsmechanische Parameter wie Kollisionsgeschwindigkeiten, kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderungen oder Fahrgastzellenbeschleunigungen betrachtet. Da zur Beschreibung der biomechanischen Belastung neben den kollisionsmechanischen Parametern auch die Insassenbewegung von entscheidender Bedeutung ist, wird nachfolgend der Bewegungsablauf von Insassen infolge leichter Pkw-Heckanstöße untersucht.

Wie grundlegende Versuche zeigten [5, 7, 8], ist der Bewegungsablauf eines Pkw-Insassen infolge einer Kollision äußerst komplex. Demzufolge können konventionelle Messmethoden mittels einzelner Beschleunigungsaufnehmer lediglich Eckdaten einer detaillierten Analyse der Insassenbewegung liefern.

*Dipl.-Ing. Wolfram Kalthoff

**Dipl.-Ing. Stefan Meyer, öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger der IHK Münster für Straßenverkehrsunfälle

***Dipl.-Ing. Manfred Becke, öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger der IHK Münster für Kfz-Technik und Straßenverkehrsunfälle
alle c/o Ing.-Büro Schimmelpennig + Becke, Münsterstraße 101, 48155 Münster-Wolbeck

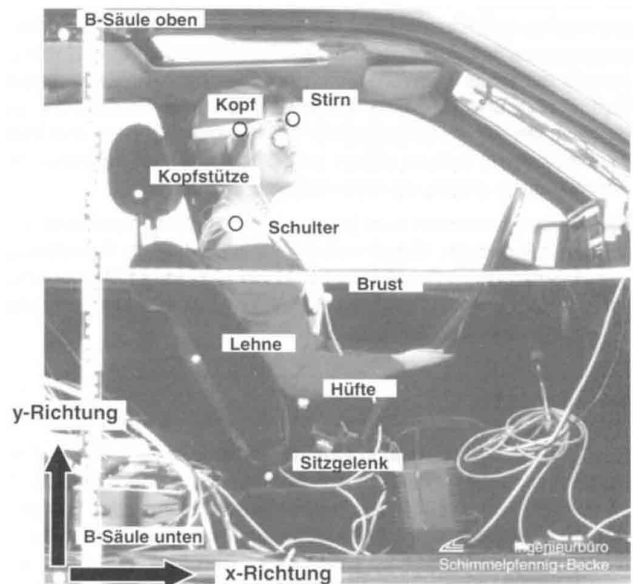


Bild 1 Markerpositionen
Fig. 1 Positions of markers

2 Untersuchungsansatz

Im Rahmen einer interdisziplinären Studie zur Bestimmung der Belastung der Halswirbelsäule durch Pkw-Heckanstöße [9] wurden 17 Pkw-Pkw- und 3 Autoskooter-Autoskooter-Heckanstöße unter Beteiligung Freiwilliger durchgeführt. Es wurden kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderungen der gestoßenen Fahrzeuge bei den Pkw-Kollisionen von 8,7 bis 14,2 km/h erreicht. Die mittleren Beschleunigungen der gestoßenen Pkw lagen zwischen 2,1 und 3,6 g.

Zusätzlich zu den rein technischen Kollisionsparametern wurde in dieser Studie besonderes Augenmerk auf die kollisionsbedingte Insassenbewegung gelegt. Die Auswertung erfolgte im Rahmen einer Diplomarbeit [3]. Es kam neben konventionellen Beschleunigungsaufnehmern an Kopf und Brust der beteiligten Freiwilligen auch eine optische Aufzeichnung der Insassenbewegung mit einer Hochgeschwindigkeits- und einer Videokamera zum Einsatz. Hierbei wurden durch ringförmig um die Kamera angebrachte Halogenlampen die an den Versuchsfahrzeugen und den Probanden angebrachten retroreflektierenden Bewegungsmarker (s. Bild 1) angestrahlt [2, 3]. Über eine Online-Punktverfolgung wurden die Reflexionen der Marker vor, während und nach dem Crash dokumentiert. Die Aufzeichnungsfrequenz lag bei 732 Hz, wobei insgesamt zehn Marker erfasst wurden. Betreut wurde die Aufzeichnung der Markerpositionen durch das Institut für Sportmedizin der Westfälischen Wilhelms-Universität Münster.

3 Messwertanalyse

Zur Analyse der Insassenbewegung lagen die zeitabhängigen Markerpositionen als Koordinaten vor. Die Richtung der Längsbewegung der Fahrgastzelle wurde als positive x-Richtung und die Hochachse der Fahrgastzelle als y-Richtung definiert (Bild 1). Es wurde zwischen Absolut- und Relativbewegung unterschieden. Bei der Absolutbewegung der Marker handelt es sich um die reale, von der Kamera aufgenommene Bewegungsbahn bzgl. der äußeren Umgebung. Die Relativbewegung dagegen beschreibt die Bewegung der Markerpunkte z.B. bezogen auf die Fahrgastzelle. Beschleunigt beispielsweise die Fahrgastzelle nach vorn und der Kopf beharrt auf Grund seiner Massenträgheit zunächst in Ruhe, so bewegt sich der Kopf relativ zur Fahrgastzelle nach hinten.

Bei der Untersuchung der Bewegungsabläufe wurden die translatorischen und rotatorischen Änderungen der Markerpositionen an Kopf,

Rumpf und Sitzlehne in Verbindung mit der Fahrzeugbewegung berechnet. Um die jeweiligen Winkeländerungen zu ermitteln, wurde die Position des Kopfes, des Rumpfes und der Sitzlehne zu Beginn der Kollision als Ausgangsposition definiert. Somit beziehen sich die Winkeländerungen jeweils auf diese Position. Durch mindestens zwei Markerpunkte bei Kopf, Rumpf und Sitzlehne wurde eine Bezugslinie definiert. Der Winkel zwischen der Verbindungslinie der Marker (z.B. Stirn und Kopf) zu Kollisionsbeginn und zu einem beliebigen anderen Zeitpunkt des Kollisionsverlaufes wurde als Winkeländerung definiert.

Der Relativwinkel zwischen zwei betrachteten Körperregionen lässt sich analog dazu berechnen. Dabei wird der Relativwinkel zu Kollisionsbeginn als Ausgangswinkel betrachtet und die sich im weiteren Verlauf der Kollision ergebenden Relativwinkel als Winkeländerung gegenüber dem Ausgangswinkel angegeben.

4 Primärbewegung

Die Bewegung eines Insassen in einem heckseitig angestoßenen Fahrzeug kann in zwei prinzipielle Hauptbewegungen unterteilt werden. Zunächst bewegt sich der Insasse relativ zum Sitz und zum Fahrzeug nach hinten (Primärbewegung). Anschließend kommt es auf Grund der Rückverformung des Sitzes zu einer relativ zum Fahrzeug nach vorn gerichteten Insassenbewegung (Sekundärbewegung). Diese dauert solange, bis der Insasse nach Überwindung der Gurtlose durch den arretierten Sicherheitsgurt zurückgehalten wird.

Der Beginn der Insassenbewegung im Rahmen der Primärbewegung ist durch eine Rumpfdrehung charakterisiert. Diese Drehung ist das Resultat aus dem translatorischen Voreilen des Hüftmarkers in x-Rich-

tung gegenüber dem Brustmarker. Dieses Verhalten liegt in der Massenträgheit des Rumpfes begründet. Zuerst wird durch die Reibung zwischen Sitzauflage und Beinen die damit direkt verbundene Hüfte und anschließend, mit einem zeitlichen Versatz, auch der Oberkörper beschleunigt [1]. Aus dieser Rumpfbewegung und dem Verharren des Kopfes in Ruhe resultiert eine Verringerung des Relativwinkels zwischen Kopf und Rumpf. Dieses Verhalten ist etwa im Bereich zwischen $t = 0,05$ bis $0,09$ s in dem in Bild 2 gezeigten Beispielversuch erkennbar ($t = 0$ s = Kollisionsbeginn). Die Abnahme des Relativwinkels zwischen Kopf und Rumpf wird als Flexionsbewegung der Wirbelsäule bezeichnet (Bild 3). Diese Flexionsbewegung ist allerdings sehr gering und vom Insassen kaum wahrnehmbar.

Im weiteren Verlauf der Kollision setzt die rotatorische Bewegung des Kopfes ein. Ähnlich der Bewegung des Rumpfes wird zunächst der Hals durch den sich nach vorn bewegenden Oberkörper beschleunigt. Hierdurch wird eine Drehbewegung des Kopfes hervorgerufen. Diese beginnende Kopfdrehung bewirkt wiederum eine Vergrößerung des Relativwinkels zwischen Kopf und Rumpf, so dass die Flexionsbewegung wieder abnimmt, bis der ursprüngliche Relativwinkel zwischen Kopf und Rumpf wieder hergestellt ist. Diese Phase lässt sich in Bild 2 im Zeitraum zwischen $t = 0,09$ und $0,11$ s erkennen.

Im weiteren Verlauf dreht sich der Kopf weiter, während der Rumpf seine maximale Winkeländerung erfahren hat, so dass sich der Relativwinkel zwischen Kopf und Rumpf weiter vergrößert. Die Flexionsbewegung geht somit in eine Extension über (Bild 3). Die hierbei erreichten Extensionswinkel lagen maximal bei 46° (Pkw) und 55° (Autoskooter).

Die Relativbewegung zwischen Kopf und Rumpf beinhaltet neben der Rotation ebenfalls eine in Fahrzeuglängsrichtung gerichtete Translation. Diese liegt darin begründet, dass der Rumpf eher als der Kopf an der allgemeinen Vorwärtsbewegung des Fahrzeugs teilnimmt. Diese translatorische Relativverschiebung zwischen Kopf und Torso lässt sich anhand der durch die Marker ermittelten Relativwege beschreiben. Hierbei ist zu berücksichtigen, dass sich bei Einsetzen der Kopfdrehung der Relativweg zwischen Kopf und Rumpf auf Grund der durch die Drehbewegung hervorgerufenen Verlagerung des Kopfmarkers verändert. Diese Wegänderung basiert auf der Drehbewegung, so dass die dadurch überlagerte translatorische Bewegung nicht mehr separat erfasst werden kann. Aus diesem Grunde wurde die relative Translationsbewegung lediglich bis zum Beginn der Kopfdrehung ermittelt. Die verschiedenen Versuche zeigten tendenziell, dass mit zunehmendem Ausgangsabstand Kopf-Kopfstütze auch größere translatorische Relativbewegungen auftraten.

Nachdem die Insassenbewegung, losgelöst vom Fahrzeug, zunächst separat betrachtet wurde, kann schließlich der Bewegungsablauf des Insassen relativ zur Fahrgastzelle dargestellt werden. Die primäre Insassenbewegung ist dabei grundsätzlich in mehrere Phasen zu unterteilen. In Bild 4 sind die wesentlichen Bewegungsphasen der Primärbewegung infolge einer Auffahrkollision im Bereich einer kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung zwischen 10 und 15 km/h dargestellt.

Für den Insassen auf einem Sitz des gestoßenen Pkw kommt es bei einem Auffahren zu einer »katapultartigen« Beschleunigung des Fahrzeugs, wobei der Insasse über den Sitz dann ebenfalls mitbeschleunigt wird. Die Analyse des Bewegungsablaufs führt zu der Erkenntnis, dass sich zu Beginn der Kollision (Phase 1 - 2) lediglich der Sitz und die Fahrgastzelle auf den ruhenden Körper des Insassen zubewegen. Der untere Bereich der Rückenlehne, der mit der Sitzfläche verbunden ist, wird stärker als der obere Bereich (auch Kopfstütze) beschleunigt. Dadurch und infolge des Kraftaustausches mit der stillstehenden Hüfte kommt es zu einer Drehbewegung der Rückenlehne relativ zum Fahrzeug nach hinten.

Durch die Reibungskräfte zwischen Sitzfläche und Oberschenkel des Freiwilligen wird dann die Hüfte nach vorn bewegt (Phase 2 - 3). Da sich der Kopf zu diesem Zeitpunkt noch nicht bewegt, kommt es hierdurch zu einer geringen, kaum wahrnehmbaren Flexionsbewegung der Wirbelsäule. Wenn die elastischen Anteile zwischen Rückenlehne und Oberkörper des Insassen aufgebraucht sind, wird der Oberkörper auf Grund des sich aufbauenden Kraftschlusses beschleunigt. Der Oberkörper nimmt nun an der Vorwärtsbewegung der Fahrgastzelle teil. Auf Grund der Voreilung des Rumpfes gegenüber dem Kopf konnte zum

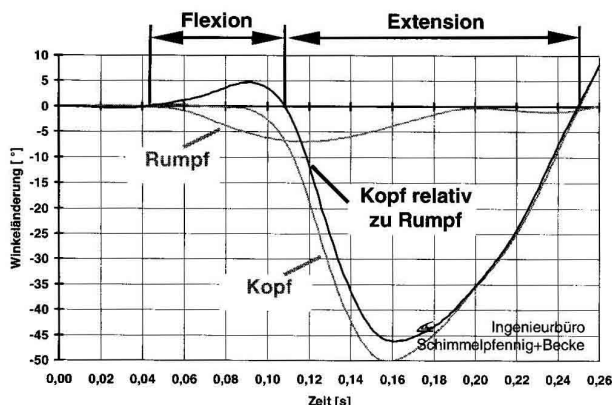


Bild 2 Winkeländerungen des Kopfes und des Rumpfes ($\Delta v_2 = 11,4$ km/h)
Fig. 2 Change in angle of head and torso ($\Delta v = 11,4$ kph)

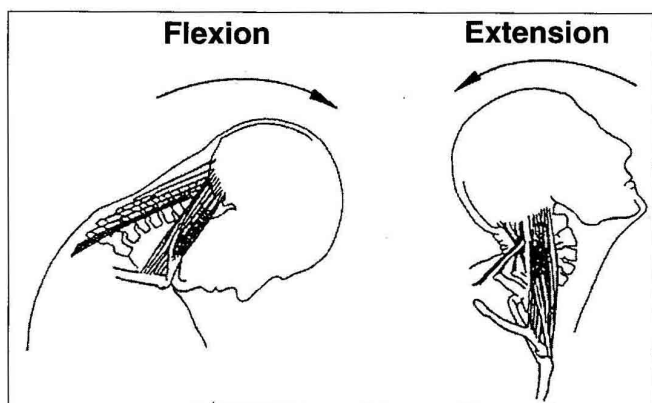
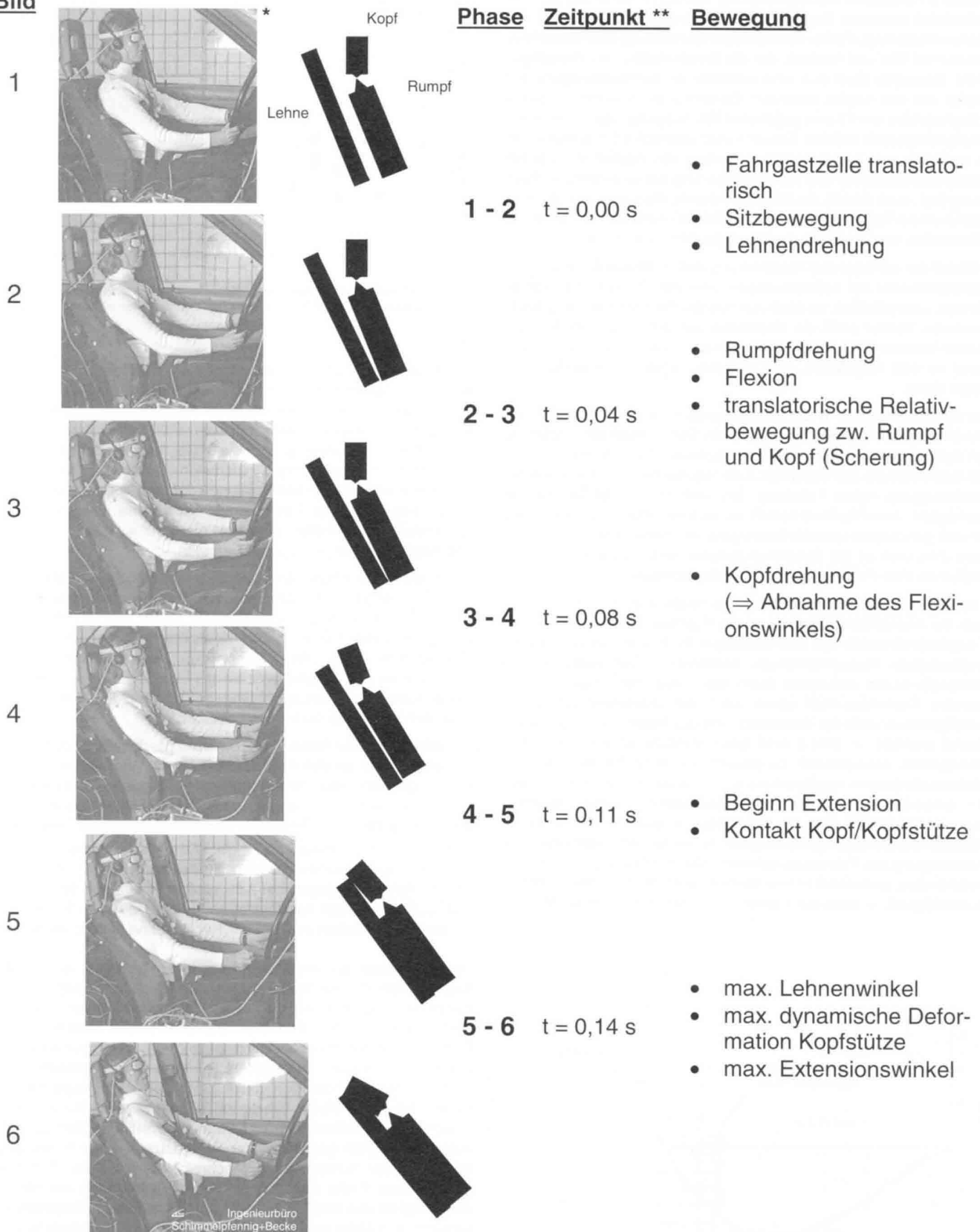


Bild 3 Beschreibung der Relativbewegung zwischen Kopf und Rumpf
Fig. 3 Description of the relative motion between head and torso

Bild



* Beispielversuch
** Mittelwerte aus 16 Pkw-Pkw-Versuchen

Bild 4 Phasen der Primärbewegung
Fig. 4 Phases of primary motion

Zeitpunkt der Flexion ebenfalls eine translatorische Relativbewegung (Scherbewegung) zwischen Rumpf und Kopf festgestellt werden.

In **Phase 3 - 4** beginnt die Kopfdrehung. Hierdurch verändert sich der Relativwinkel zwischen Kopf und Rumpf, woraus eine Abnahme des Flexionswinkels folgt. Ferner kommt es zur Fortsetzung des Kraftschlusses zwischen Sitz und Insasse, der die Schulterblätter der Freiwilligen erreicht. Daraufhin lässt sich eine einsetzende Vertikalbewegung des Rumpfes und des Kopfes erkennen. Es konnte ein maximaler Anstieg des Kopfmarkers um 73 mm gegenüber der Ausgangslage in vertikaler Richtung festgestellt werden. Dieser Höhenunterschied resultiert einerseits aus dem rein translatorischen Anstieg des Kopfes in vertikaler Richtung und zusätzlich aus der Überlagerung der einsetzenden Kopfdrehung (vgl. auch Bild 3). Es ist somit möglich, dass eine im Fahrzeugstillstand mit der Kopfoberkante abschließende Kopfstütze im Falle eines Heckanstoßes vom Kopf des Insassen deutlich überragt wird.

Auf Grund der anhaltenden Kopfdrehung wird in **Phase 4 - 5** der Ausgangsrelativwinkel bei Kollisionsbeginn zwischen Rumpf und Kopf erreicht bzw. überschritten, so dass sich nun der Relativwinkel vergrößert. Im weiteren Verlauf prallt die Kopfstütze auf den Kopf. Der Abstand zwischen Insasse und Lenkrad kann sich wie in dem in Bild 4 gezeigten Beispiel so weit vergrößern, dass sich die Hände des Insassen vom Lenkrad lösen.

In der letzten **Phase 5 - 6** der Primärbewegung wird die Rückenlehne maximal ausgelenkt. Weiterhin erreicht die Deformation der Kopfstütze durch den Kontakt mit dem Kopf den höchsten Wert. Zu diesem Zeitpunkt liegt ebenfalls der maximale Extensionswinkel vor. Am Ende der Primärbewegung haben Fahrzeug, Sitz und Insasse die gleiche Geschwindigkeit. Anschließend kommt es zu einer relativ zum Fahrzeug nach vorn gerichteten Insassenbewegung, der Sekundärbewegung. Zu diesem Zeitpunkt ist die Beschleunigungseinwirkung bei einer durchschnittlichen Pkw-Pkw-Auffahrkollision abgeschlossen.

Bei der Analyse der Insassenbewegung relativ zum Fahrzeug wurde insbes. der Anprall der Kopfstütze an den Kopf des Insassen untersucht. Der Kopfanprall wurde von den freiwilligen Probanden oftmals als der unangenehmste Versuchseindruck beschrieben. Der Zeitpunkt des Kopfanpralls wurde redundant durch den Abbau des ursprünglichen Abstandes Kopfstütze-Kopf sowie durch die charakteristischen Geschwindigkeitsverläufe der Kopfstütze und des Kopfes relativ zur Fahrgastzelle ermittelt. In **Bild 5** sind diese Verläufe anhand eines Beispielversuches exemplarisch dargestellt. Zunächst haben Kopf und Kopfstütze die gleiche negative Relativgeschwindigkeit zur Fahrgastzelle, d.h. sie bewegen sich relativ zur Fahrgastzelle nach hinten. Ab einem bestimmten Zeitpunkt wird die Kopfstütze langsamer und kehrt anschließend ihre Bewegungsrichtung um, da sie an der allgemeinen Vorwärtsbewegung des Fahrzeugs teilnimmt. Der Kopf bewegt sich zeitlich versetzt analog, jedoch hat er eine höhere, relativ nach hinten gerichtete Geschwindigkeit, so dass die Kopfstütze auf den Kopf trifft. Im Moment

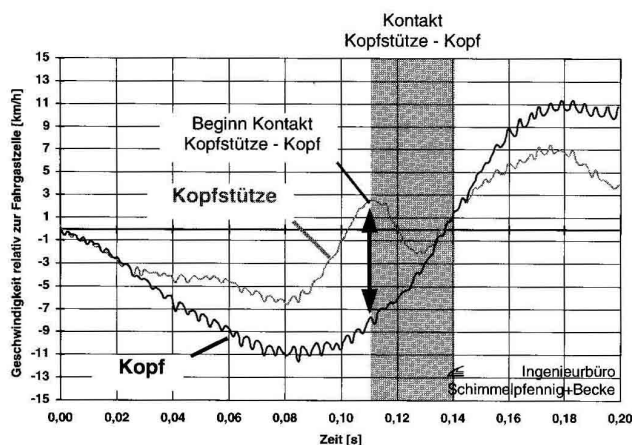


Bild 5 Relativgeschwindigkeiten Kopf und Kopfstütze gegenüber Fahrgastzelle ($\Delta v = 11,4 \text{ km/h}$)

Fig. 5 Velocities of head and headrest relative to vehicle ($\Delta v = 11,4 \text{ kph}$)

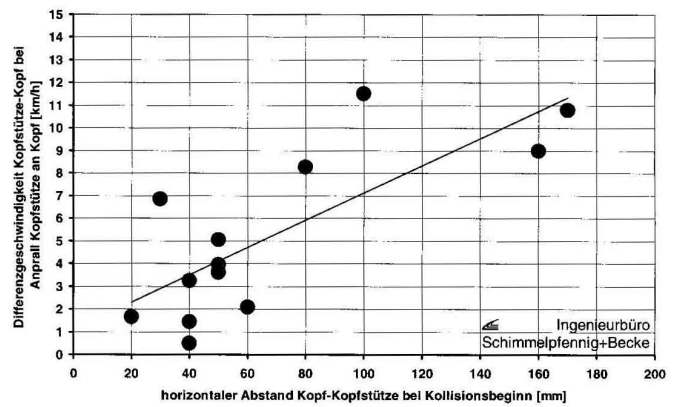


Bild 6 Differenzgeschwindigkeit Kopf-Kopfstütze sowie lineare Regressionslinie
Fig. 6 Relative velocity of head and headrest and linear line of regression

des Kopfstützenanpralls an den Kopf – die Kopfstütze hat bereits eine höhere Geschwindigkeit als die Fahrgastzelle (positive relative Geschwindigkeit) – kehrt diese wiederum ihre Bewegungsrichtung um und verlagert sich für einen kurzen Zeitraum relativ zum Fahrzeug betrachtet nach hinten. Diese Bewegungsumkehr resultiert aus der abnehmenden, aber immer noch nach hinten gerichteten Geschwindigkeit des Kopfes. Anschließend bewegen sich Kopf und Kopfstütze mit gleicher Geschwindigkeit gegenüber der Fahrgastzelle nach vorne. Dann wird die Geschwindigkeit des Kopfes größer als die der Kopfstütze, so dass Kopf und Kopfstütze sich voneinander trennen.

Die Auswertung zeigte, dass der Zeitraum zwischen Kopfanprall und Erreichen der gleichen Kopf- und Kopfstützengeschwindigkeit charakteristisch für die Härte der Kopfstütze ist. Dabei liegt der Mittelwert der ermittelten Zeiträume bei harten Kopfstützen (0,01 s) unter dem Wert weicher Kopfstützen (0,04 s). Das bedeutet, dass bei harten Kopfstützen auf Grund der geringeren Elastizität des Materials die Geschwindigkeitsangleichung schnell erfolgt, wohingegen bei weichen Kopfstützen noch eine vorhergehende Verformung stattfindet.

Weiterhin wurde die Relativ- bzw. Differenzgeschwindigkeit der Kopfstütze beim Anprall an den Kopf als Maß für die Anpralhärte untersucht. Hier zeigte sich, dass mit zunehmendem Abstand zwischen Kopf und Kopfstütze bei Kollisionsbeginn auch die Relativgeschwindigkeit deutlich ansteigt (**Bild 6**). Dies gilt für horizontale Abstände zwischen Kopf und Kopfstütze von etwa 2 bis 17 cm. Wie weiterführende Untersuchungen zur Insassenbelastung bei Heckkollisionen zeigen, nimmt die Kopfanprallintensität dagegen bei sehr großen Abständen zwischen Kopf und Kopfstütze infolge von deutlich nach vorn gebeugten Sitzpositionen, bei denen der Rücken nicht an der Rückenlehne anliegt, wieder ab [6].

Um den Ablauf der Insassenbewegung zu erläutern, sind in **Bild 7** exemplarisch die absolute Fahrgastzellengeschwindigkeit und relativ hierzu die Schulter- sowie die Kopfgeschwindigkeit eines Insassen dargestellt. Weiterhin ist in dieses Schaubild der Winkel zwischen Kopf und Rumpf (Extension bzw. Flexion) eingezeichnet. Die einzelnen Körperregionen des Insassen bewegen sich infolge eines Heckanstoßes zunächst im Rahmen der Primärbewegung relativ zur Fahrgastzelle nach hinten. Am Ende dieser Bewegung haben sie die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung des Fahrzeugs erreicht, so dass deren Relativgeschwindigkeit gegenüber der Fahrgastzelle einen Nulldurchgang erfährt. Dieser Nulldurchgang beschreibt das Ende der Primärbewegung. Dieses Ende, bezogen auf den Nulldurchgang der Relativgeschwindigkeit des Kopfes, lag bei den diesbezüglich auswertbaren elf Versuchen im Mittel bei 0,12 s. Bei einem Versuch lag dieser Nulldurchgang bei ca. 0,19 s nach Einsetzen der Fahrgastzellenbeschleunigung. Dieser Versuch nimmt jedoch gegenüber den anderen Tests eine Sonderstellung ein, da die Kollisionsdauer dieses Versuchs mit 0,17 s extrem lang und der Abstand des Kopfes des Probanden von der Kopfstütze bei Kollisionsbeginn mit 170 mm der größte aller Versuche war (s. auch Bild 6). Am Ende der Primärbewegung liegt ferner der Kopf an der Kopfstütze an und es kommt im Mittel bei 0,14 s ($n = 7$) nach

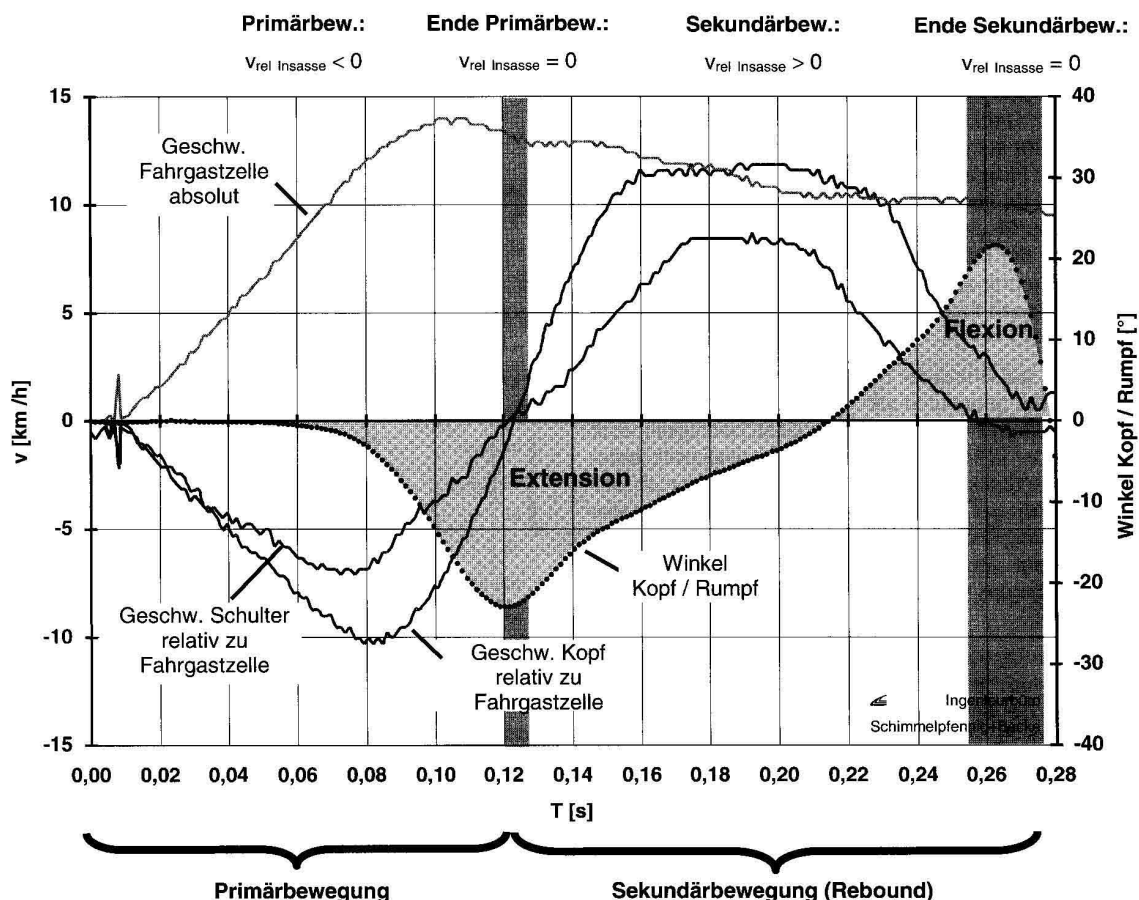


Bild 7 Geschwindigkeiten der Fahrgastzelle, der Schulter und des Kopfes sowie Winkel Kopf/Rumpf ($\Delta v_2 = 14,2 \text{ km/h}$)

Fig. 7 Velocities of the vehicle, the shoulder and the head as well as angle head/torso ($\Delta v = 14,2 \text{ kph}$)

Kollisionsbeginn zum maximalen Extensionswinkel zwischen Rumpf und Kopf.

5 Sekundärbewegung

Nach der Beschreibung der Primärbewegung wird nun die Sekundärbewegung des Insassen analysiert. Hierbei vollzieht der Insasse des gestoßen Fahrzeuges bei Heckkollisionen auf Grund der Sitzelastizität nach Erreichen der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung eine relativ zum Fahrzeug nach vorn gerichtete Bewegung. Diese wird durch den Sicherheitsgurt begrenzt. Am Ende dieser »Rebound-Bewegung« kommt es beim Einsetzen der Rückhaltewirkung des Gurtes zunächst zu einer Verzögerung des Oberkörpers, wobei der Kopf sich noch ungehindert weiter nach vorn bewegt. Im weiteren Verlauf wird die Verzögerung des Kopfes nun allein durch den Hals geleistet. Weil dessen Haltekraft deutlich unterhalb des Kopfschwerpunktes angreift, gerät der Kopf in eine nach vorn gerichtete Rotationsbewegung, die wiederum eine Flexion der Wirbelsäule zur Folge hat. Dieser Bewegungsablauf am Ende der Sekundärbewegung ist prinzipiell mit demjenigen einer Frontalkollision zu vergleichen. Bei einer Frontalkollision bewegen sich die Fahrzeuginsassen ebenfalls relativ zum Fahrzeug nach vorn, bis sie durch den Gurt zurückgehalten werden.

In der Rebound-Phase (Sekundärbewegung) ist die eigentliche Kollision bereits beendet, so dass die Fahrgastzelle in Abhängigkeit der Auslaufverzögerung die erreichte Stoßausgangsgeschwindigkeit beibehält bzw. abbaut (Bild 7). Der Körper des Insassen wird jedoch auf Grund der Sitzelastizität gegenüber der Fahrgastzelle nach vorn beschleunigt. Der maximale Extensionswinkel wird abgebaut, bis sich der ursprüngliche Relativwinkel zwischen Rumpf und Kopf wieder eingestellt hat. Schließlich ist das Ende der Sekundärbewegung erreicht. Hierbei kommt es zum Einsetzen der Rückhaltewirkung des Sicherheitsgurtes, wodurch

die Relativgeschwindigkeit des Torsos gegenüber der Fahrgastzelle bis auf null abgebaut wird. Das Ende der Sekundärbewegung bezogen auf den Nulldurchgang der Relativgeschwindigkeit des Kopfes lag bei vier diesbezüglich auswertbaren Versuchen im Mittel bei 0,26 s nach Kollisionsbeginn.

Auf Grund des Versuchsaufbaus, der im Wesentlichen auf die Untersuchung der Primärbewegung ausgerichtet war, konnten mit zunehmender Aufzeichnungsdauer nicht mehr alle Markerpositionen zuverlässig erfasst werden. So wurde lediglich bei vier Versuchen der abschließende Nulldurchgang der Relativgeschwindigkeit des Kopfes noch aufgezeichnet. Das Ende der Sekundärbewegung des oben angesprochenen Versuches mit einer Kollisionsdauer von 0,17 s lag ebenfalls nicht mehr in

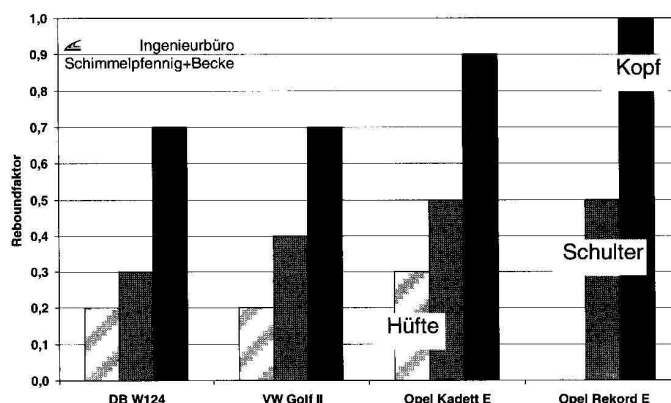


Bild 8 Reboundfaktoren in Abhängigkeit des Fahrzeugtyps
Fig. 8 Rebound-factor of different cars

dem Bereich der bei diesem Test bis 0,29 s laufenden Aufzeichnungsdauer. Somit sind noch längere Sekundärbewegungen möglich. Dieser Umstand sollte bei weiteren Versuchen Berücksichtigung finden.

Innerhalb der Sekundärbewegung kommt es ferner zu einer Flexionsbewegung der Wirbelsäule. Der Übergang von Extension zu Flexion lag bei sechs hierzu auswertbaren Versuchen im Mittel bei 0,23 s nach Kollisionsbeginn. Bei der Flexionsbewegung tritt eine Belastung an der Halswirbelsäule auf, wie sie auch bei Frontalkollisionen erfolgen kann. Findet zu diesem Zeitpunkt ein zusätzlicher Frontalaufprall statt, so überlagern sich die aus der Heck- und Frontalkollision resultierenden Flexionsbelastungen. Derartige, für die Insassenbelastung entscheidende Mechanismen können beispielsweise bei Serienauffahrkollisionen auftreten.

Die Belastungsintensität auf Grund der Sekundärbewegung wird durch die Relativgeschwindigkeit gegenüber der Fahrgastzelle (Reboundgeschwindigkeit) in dieser Phase bestimmt. Diese Geschwindigkeit lässt sich in Verbindung mit der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung durch den »Reboundfaktor« beschreiben. Dabei entspricht der Reboundfaktor der Relation der Reboundgeschwindigkeit zur kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung. Bei einem Reboundfaktor von beispielsweise 0,5 bewegt sich die betrachtete Körperregion mit der Hälfte der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung relativ zur Fahrgastzelle nach vorn.

In Bild 8 sind die in den Versuchen ermittelten Rebound-Faktoren in Abhängigkeit der verschiedenen Fahrzeugtypen dargestellt. Es zeigte sich, dass sich am Ende der Sekundärbewegung die Hüfte mit etwa 20 bis 30 %, die Schulter mit ca. der Hälfte und der Kopf mit etwa 70 bis 100 % der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung relativ zur Fahrgastzelle nach vorn bewegen.

Da Verletzungen der Halswirbelsäule sowohl bei Frontal- als auch bei Heckkollisionen vorgetragen werden, wurde in einer Untersuchung [4] nach einem biomechanischen Belastungsmechanismus gesucht, der bei beiden Kollisionstypen auftritt. Aus diesem Grunde wurde in dieser Untersuchung ebenfalls die Analyse der Sekundärbewegung mit in die Auswertung von Heckanstoßen einbezogen. Hierbei wurden verschiedenen Fahrzeugsitze mit Hilfe eines Schlittens rückwärts gegen eine Barriere bewegt. Über eine Videokamera wurde die Bewegung des auf dem Sitz befindlichen Dummies (Hybrid II) aufgenommen.

In der oben genannten Versuchsreihe wurde festgestellt, dass die am Kopf und an der Schulter des Dummies aufgezeichneten Messwerte sich kaum voneinander unterscheiden. Dies wurde auf die Fixierung des Kopfes am Rumpf des Hybrid II zurückgeführt. Demgegenüber weisen die in Bild 8 dargestellten Messwerte der einzelnen Körperregionen der Versuchspersonen deutliche Unterschiede in der Reboundgeschwindigkeit auf. Hieraus lässt sich u.a. folgern, dass zur biomechanischen Analyse einer realistischen Insassenbewegung freiwillige Probanden gegenüber Dummies vorzuziehen sind. Dies gilt natürlich nur bei geringen Anstoßintensitäten.

In [4] wurde die relative Reboundgeschwindigkeit als Quotient aus der vorkollisionsären Anstoßgeschwindigkeit an die Barriere und der maximalen Geschwindigkeit des Dummies nach dem Crash berechnet. Es wurden Anstoßgeschwindigkeiten zwischen 15,3 und 20,1 km/h und Geschwindigkeiten des Rumpfes aus dem Sitz heraus zwischen 13 und 26 km/h ermittelt. Die relative Reboundgeschwindigkeit lag hierbei zwischen 0,80 und 1,30. Hieraus wurde gefolgert, dass die Reboundgeschwindigkeit über der Barrierenanprallgeschwindigkeit liegen kann.

Die Anstoßgeschwindigkeit eines Fahrzeuges führt je nach Kollisionstyp zu unterschiedlichen kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderungen und somit zu unterschiedlichen Insassenbelastungen. So liegt die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung eines Fahrzeuges bei einem Anstoß an einen Pkw unterhalb derjenigen, die auf Fahrzeuginsassen bei einer Kollision mit einer festen Barriere mit der gleichen Anstoßgeschwindigkeit wirkt. Aus diesem Grund ist im Hinblick auf vergleichbare Insassenbelastungen die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung weitaus aussagekräftiger als die Anstoßgeschwindigkeit.

Bei einer Kollision mit einer festen Barriere liegt die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung auf Grund der Teilelastizität und der daraus resultierenden rückwärts gerichteten Ausgangsgeschwindigkeit noch

DB W124	188 Nm/°
VW Golf II	122 Nm/°
Opel Kadett E	105 Nm/°

Tabelle 1 Sitzsteifigkeiten
Table 1 Stiffness coefficients

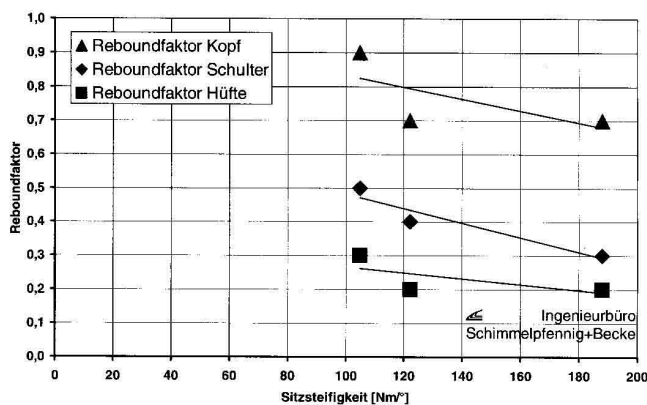


Bild 9 Mittlere Reboundfaktoren in Abhängigkeit der Sitzsteifigkeiten
Fig. 9 Average rebound-factors depending on different stiffness coefficients

oberhalb der Anstoßgeschwindigkeit. Daraus folgt, dass die in [4] angegebenen relativen Reboundgeschwindigkeiten im Hinblick auf einen Vergleich mit den in Bild 8 durchgeführten Reboundfaktoren nach unten hin korrigiert werden müssen.

Ferner wurde in der oben angesprochenen Untersuchung [4] der Zusammenhang zwischen Reboundgeschwindigkeit und Sitzlehnensteifigkeit untersucht. In Anlehnung an diese Untersuchungsergebnisse wurde ebenfalls die Sitzlehnensteifigkeit eines Mercedes Benz W 124, eines VW Golf II und eines Opel Kadett E (an den hier vorgestellten Versuchen beteiligte Fahrzeugtypen) ermittelt. Hierzu wurde rechtwinklig zur Lehne die zum Auslenken notwendige Kraft gemessen. Ferner wurden der Auslenkungswinkel und der wirkende Hebelarm bestimmt. Im Mittel ergaben sich die in Tabelle 1 aufgeführten Steifigkeiten. In [4] werden Werte von 80 bis 272 Nm/° für verschiedene Sitze angegeben.

Gemäß den Ausführungen in [4] wird des weiteren eine Relation zwischen der Sitzsteifigkeit und der relativen Reboundgeschwindigkeit abgeleitet. Danach nimmt mit zunehmender Sitzsteifigkeit auch die relative Reboundgeschwindigkeit zu. Den hier vorliegend ermittelten Reboundfaktoren lässt sich jedoch tendenziell der entgegengesetzte Zusammenhang entnehmen, wie die in Bild 9 dargestellten mittleren Reboundfaktoren inklusive der Regressionsgeraden zeigen.

Ein Extrembeispiel stellen Autoskooter-Kollisionen dar. Hier ist die Rückenlehne praktisch starr. Der Reboundfaktor wurde in einem Versuch für die Schulter mit 30 % und für den Kopf mit 40 % ermittelt. Für eine statistisch abgesicherte Aussage wäre hier jedoch eine Versuchsreihe mit einer ausreichenden Anzahl an unterschiedlichen Fahrzeugsitzen notwendig.

6 Vergleich der Insassenbewegung in Pkw und Autoskooter

Bereits in [9] wurde eine Pkw-Kollision kollisionsmechanisch einem Autoskooter-Anstoß gegenübergestellt. Nachfolgend sollen die bei Pkw- und bei Skooter-Kollisionen auftretenden Bewegungsabläufe analysiert werden. Dabei ist es sinnvoll, die zeitlichen Abfolgen der einzelnen Bewegungsphasen vergleichend zu betrachten.

In den Bildern 10 und 11 sind die Durchschnittswerte für die Bewegungsphasen der untersuchten Pkw- und Skooter-Kollisionen gezeigt. Der Kollisionsbeginn ist durch das Einsetzen der Fahrgastzellenbewe-

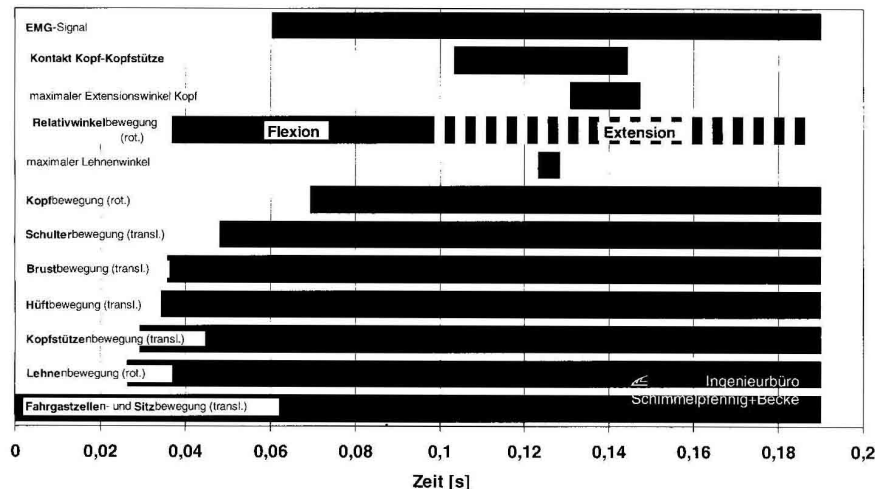


Bild 10 Phasen der einzelnen Bewegungszustände bzgl. Kollisionsbeginn (Mittelwerte aus 16 Pkw-Versuchen)

Fig. 10 Phases of movements relative to begin of collision (average of 16 car-crash-tests)

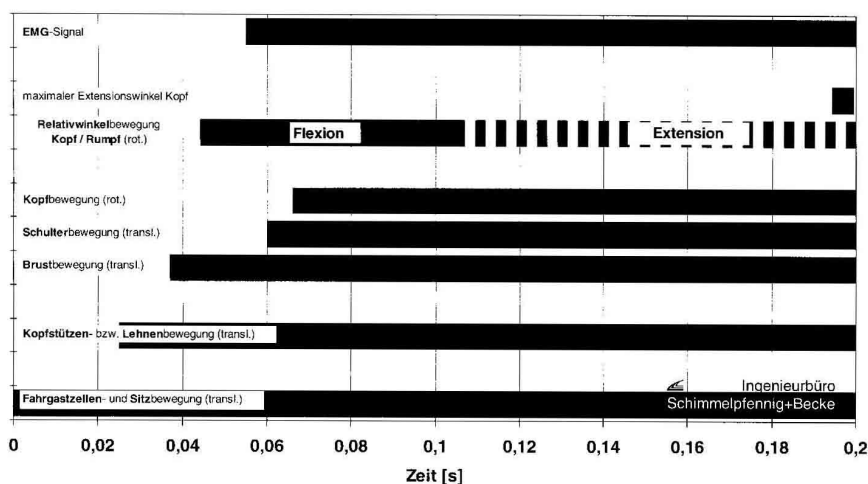


Bild 11 Phasen der einzelnen Bewegungszustände bzgl. Kollisionsbeginn (Mittelwerte aus 3-Scooter-Versuchen)

Fig. 11 Phases of movements relative to begin of collision (average of 3 Scooter-crash-tests)

gung charakterisiert. Zu diesem Zeitpunkt beginnt ebenfalls bei allen Versuchen die Sitzbewegung. Anschließend folgen im Mittel der Versuche die rotatorische Lehn- und translatorische Kopfstützenbewegung etwa zum gleichen Zeitpunkt. Daraufhin beginnt bei den Pkw-Insassen die Bewegung der Hüfte und der Brust. Der zeitliche Abstand dieser beiden Bewegungsphasen ist dabei sehr gering. Die Brustbewegung der Scooter-Insassen erfolgt analog zu den Pkw-Insassen. Mit deutlichem zeitlichen Versatz folgt bei Pkw- und Scooter-Insassen die Schulterbewegung. Die Kopfbewegung beginnt sowohl bei Scooter als auch bei Pkw-Versuchen nach dem Beginn der Schulterbewegung. Kurz nach Hüft- und Brustbewegungsbeginn erfährt die Wirbelsäule des Pkw-Insassen eine Flexionsbewegung.

Die Zeitpunkte der Flexions- und Extensionsbewegung sind bei Scooter- und Pkw-Versuchen nahezu gleich. Die Extensionsbewegung beginnt im Mittel noch vor dem Kontakt Kopfstütze-Kopf und erreicht ihren Maximalwert am Ende des Kontaktes Kopfstütze-Kopf. Die Extensionsbewegung des Autoscooter-Insassen dauert länger als die des Pkw-Insassen. Der geringfügig höhere maximale Extensionswinkel des Auto-Scooter-Insassen (Pkw: max. 46°, Scooter: max. 55°), wird später erreicht, was auf die für erwachsene Benutzer nicht ausreichend hohe Kopfabstützung (Kopfstütze) im Autoscooter zurückzuführen ist. Der Zeitpunkt des maximalen Lehnwinkels befindet sich etwa in der Mitte des Zeitpunktes des Kopfstützen-Kopfkontaktes und kurz vor dem Erreichen des maximalen Extensionswinkels. Eine Muskelreaktion ist anhand der EMG-Signale [9] bei den Pkw- sowie auch bei den Autoscooter-Versuchen etwa in der Mitte der Flexionsphase zu erkennen.

Insgesamt zeigen die Bewegungsabläufe der Pkw- und Scooter-Insassen deutliche Parallelen. Bei beiden Versuchsreihen ergibt sich ein kaskadenförmiges Einsetzen der einzelnen Bewegungsanfänge, das mit der Bewegung der Fahrgastzelle und des Rumpfes beginnt und sich

schließlich bis zur Kopfbewegung fortsetzt. Die kinetische Energie wird somit vom Sitz aus am Rumpf beginnend auf den Insassen übertragen.

7 Fazit

Der vorliegende Beitrag soll die Bewegung eines Insassen in einem heckseitig angestoßenen Fahrzeug fundamental verdeutlichen. Die Analyse des Bewegungsablaufes zeigt, dass die Bewegungen von Pkw-Insassen bei einem Heckanstoß vergleichbar mit denjenigen von Autoscooterinsassen sind. Allerdings kommt es auf Grund der für erwachsene Benutzer nicht ausreichend hohen Kopfstütze bei Autoscooterinsassen zu einem geringfügig höheren maximalen Extensionswinkel.

Neben der »klassischen« Primärbewegung wurde auch die Sekundärbewegung (Rebound) untersucht. Während der Primärbewegung bewegt sich der Fahrzeuginsasse relativ zum Fahrzeug nach hinten. Dabei kommt es zunächst zu einer Flexions- und dann zu einer Extensionsbewegung der Wirbelsäule. Diese Primärbewegung ist im Mittel 0,12 s nach Kollisionsbeginn beendet. Dann bewegt sich der Insasse relativ zum Fahrzeug nach vorne.

Auf die Primärbewegung folgt die Sekundärbewegung. Schließlich setzt die Rückhaltewirkung des Sicherheitsgurtes ein, wodurch sich die Relativgeschwindigkeit des Körpers gegenüber der Fahrgastzelle verringert. Die Sekundärbewegung der auswertbaren Versuche war bei durchschnittlich 0,26 s (Nulldurchgang der Relativgeschwindigkeit des Kopfes) nach Beginn der Kollision abgeschlossen. Ein späteres Ende der Sekundärbewegung ist ebenfalls vorstellbar.

Innerhalb der Sekundärbewegung erreicht der Kopf seinen ursprünglichen Relativwinkel gegenüber dem Rumpf, und die Halswirbelsäule erfährt eine Flexionsbewegung, wie sie auch bei Frontalkollisionen auf-

tritt. Dieser Umstand ist insbesondere bei der Analyse von Serienauffahrkollisionen interessant. Stellt man sich vor, dass im Rahmen einer Serienauffahrkollision ein Fahrzeug zunächst heckseitig angestoßen und infolge dessen auf ein weiteres Fahrzeug aufgeschoben wird, so erfährt der Insasse zunächst eine Extension und anschließend durch den Rebound eine Flexion der Wirbelsäule. Findet der Anstoß an das davor befindliche Fahrzeug innerhalb der Sekundärbewegung und hier insbesondere während der Flexion statt, also etwa zwischen 0,20 und 0,30 s nach Beginn des Heckaufpralls, so kommt es zu einer Überlagerung der Flexionsbelastung infolge des Rebounds des Heckanstoßes und der nunmehr noch stattfindenden Frontalkollision. Insbesondere bei langen Kollisionsdauern und großen Abständen des Kopfes von der Kopfstütze ist eine Überlagerung auch noch später vorstellbar. In Verbindung mit dem Reboundfaktor lässt sich die aus der Überlagerung resultierende, maximal vorstellbare Insassenbelastung berechnen.

Basierend auf mehreren Versuchen konnte gezeigt werden, dass mit zunehmendem Abstand Kopf/Kopfstütze deren Relativgeschwindigkeit beim Zusammenprall ansteigt. Die freiwilligen Probanden beschrieben insbesondere den Kopfstützenanprall an den Kopf als unangenehm. Bei extrem vorgelagerten Sitzhaltungen ohne Rückenkontakt an der Lehne kehrt sich dieser Effekt jedoch um, hier muss es nicht zwangsläufig zu einem Kopfkontakt kommen [6]. Im Hinblick auf eine geringe Kopfanprallintensität ist folglich bei einer »normalen« Sitzhaltung auf einen möglichst geringen Ausgangsabstand des Kopfes von der Kopfstütze zu achten.

Die Analyse des Bewegungsablaufes zeigte weiterhin, dass es zu einer Vertikalbewegung des Insassen im Fahrzeug kommt, wodurch es möglich ist, dass der Kopf die zu Beginn auf Scheitelhöhe eingestellte Kopfstütze im Laufe der Kollision überragt. Daraus folgt, dass die Kopfstützen mindestens auf Kopfhöhe eingestellt werden, besser diese überragen sollte. Weiterhin deuten die Messwerte neben dem Hochrutschen des gesamten Insassen auf eine vertikale Relativbewegung der einzelnen Körperregionen hin.

Bei der Analyse der Daten wurden die Grenzen eines ortsfesten Videoanalyse-Systems deutlich. Auf Grund der Dynamik des Crash konnten nicht alle Marker bei allen Versuchen gleichmäßig erfasst werden. Für zukünftige Versuche bietet es sich daher an, die Probanden mit möglichst vielen, redundanten Markern bzw. Messpunkten auszustatten, um so die Insassenbewegungen ausfallsicher und differenziert aufnehmen zu können. Ferner muss ein Aufnahmesystem etabliert werden, das fest im Fahrzeug installiert ist und somit kontinuierlich und unbeeinflusst vom Bewegungszustand der Fahrgastzelle mit ausreichender Aufzeichnungsdauer die Insassenbewegung erfassen kann.

Literaturnachweis

- [1] Böhrmann, R.: Experimentelle Untersuchung der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung zur Bestimmung der biomechanischen Belastung. Fachhochschule Osnabrück, Fachbereich Maschinenbau, Diplomarbeit, 1997.
- [2] Greif, H., Theysohn H.: Das Hentschel-System HSG 84.330 projektiert an der Universität Münster, in: Boenigk, U.; Näder M. (Hrsg.): Gangbildanalyse, Int. Symposium Berlin 2./3.2.1990, Mecke Verlag, Duderstadt, 1991.
- [3] Kalthoff, W.: Experimentelle Untersuchung der Möglichkeiten und Grenzen der Bestimmung der Insassenbewegung auf der Grundlage der Fahrzeugbeschädigungen nach Pkw-Auffahrkollisionen, Fachhochschule Osnabrück, Fachbereich Maschinenbau, Diplomarbeit, 1997.
- [4] von Koch, M., Kullgren, A., Lie, A., Nygren An., Tingvall C.: Soft Tissue Injury of the Cervical Spine in Rear-End and Frontal Car Collisions. Int. IRCOBI Conference on the Biomechanics of Impact, Brunnen, Schweiz, 1995, S. 273 - 283.
- [5] Meyer, St.: Experimentelle Untersuchung des Zusammenhangs zwischen technischen Kollisionsparametern und der Bewegungskinetik von Insassen im Hinblick auf leichte HWS-Schleudertraumen. Universität Hannover, Fachbereich Maschinenbau, Institut für Kraftfahrzeugwesen, Diplomarbeit, 1993.
- [6] Meyer, St., Becke, M., Kalthoff, W., Castro, W.: FIP – Forward Inclined Position, Insassenbelastung infolge vorgebeugter Sitzposition bei leichten Heckkollisionen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 37 (1999), Nr. 7/8, S. 213 - 218.
- [7] Meyer St., Hugemann, W., Weber, M.: Zur Belastung der Halswirbelsäule durch Auffahrkollisionen – Teil 1. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 32 (1994), Nr. 1, S. 15 - 21.
- [8] Meyer, St., Hugemann, W., Weber, M.: Zur Belastung der Halswirbelsäule durch Auffahrkollisionen – Teil 2. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 32 (1994), Nr. 7/8, S. 187 - 191.
- [9] Meyer, St., Weber, M., Kalthoff, W., Schilgen, M., Castro, W.: Freiwilligen-Versuche zur Belastung der Halswirbelsäule durch Pkw-Heckanstoße. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 37 (1999), Nr. 1, S. 13 - 24. ■