

# Vergleich der Insassenbelastung beim Frontalaufprall mit unterschiedlichem Grad der Gurtnutzung

Von Annika Kortmann \*

Die biomechanische Belastung eines Insassen bei einer Frontalkollision ist nicht nur mit der Zellenbeschleunigung der Fahrgastzelle verknüpft. Bei Frontalkollisionen mit Airbagauslösung kommt es zu einem Zusammenspiel zwischen Gurt und Airbag, um Relativbewegung des Insassen im Fahrzeug nach vorn zu verringern und das Risiko eines Anpralls an den Fahrzeuginnenraum zu minimieren. Welche Belastungen dabei auf den Kopf, die Brust und die Hüfte eines Insassen bei der zuvor beschriebenen Kollision auftreten und inwieweit die unsachgemäße Nutzung des Sicherheitsgurts einen Einfluss auf die biomechanische Belastung hat, wurde bisher versuchstechnisch durch Sachverständige für Unfallrekonstruktion noch nicht untersucht. Aus diesem Grund wurde eine Versuchsreihe durchgeführt, bei der jeweils ein Ford Focus mit 50 km/h frontal gegen einen Baum prallte und der kollisionsbedingte Beschleunigungsverlauf für den Fahrer durch den Einsatz von biofidelen, mit Messtechnik ausgestatteten Dummies aufgezeichnet wurde. Bei den insgesamt drei Versuchen war der Dummy auf dem Fahrersitz zunächst nicht angegurtet, im zweiten Versuch verlief der Brustgurt vor der Kollision neben der linken Schulter und im letzten Versuch wurde der Dreipunkt-Sicherheitsgurt vorschriftsmäßig genutzt. Die gewonnenen Ergebnisse werden diskutiert und für den Grad der Gurtnutzung einander gegenübergestellt.

## 1 Einleitung

Ein häufiges Thema in der Unfallrekonstruktion ist die Ermittlung der biomechanischen Belastung auf den Insassen bei einer Fahrzeugkollision. Aus bekannten Studien (u. a. [1, 2, 3, 4, 5, 6]) wurde in Zusammenarbeit mit medizinischen Sachverständigen ein Zusammenhang zwischen der kollisionsbedingten Zellenbeschleunigung beziehungsweise der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung der Fahrgastzelle und der biomechanischen Belastung für den Insassen hergestellt. Bei geringen Heck-, Front- und Seitenanstoßen war dies durch Freiwilligenversuche möglich. In der Praxis wird die auf den Insassen wirkende Belastung durch den technischen Sachverständigen u. a. durch die mittlere Zellenbeschleunigung des Fahrzeugs oder

die korrespondierende kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung ermittelt, so dass der Mediziner darauf aufbauend das Verletzungsrisiko interpretieren kann.

Die tatsächlich aufgetretenen Beschleunigungen des Kopfs, der Brust oder der Hüfte des Insassen bleiben in der Regel unberücksichtigt, da die Höhe der Zellenbeschleunigung aus den Fahrzeugschäden bestimmt und für geringe Kollisionsschwere die mittlere Zellenbeschleunigung dann mit dem Befinden der Insassen aus den Freiwilligen-Versuchen korreliert werden kann.

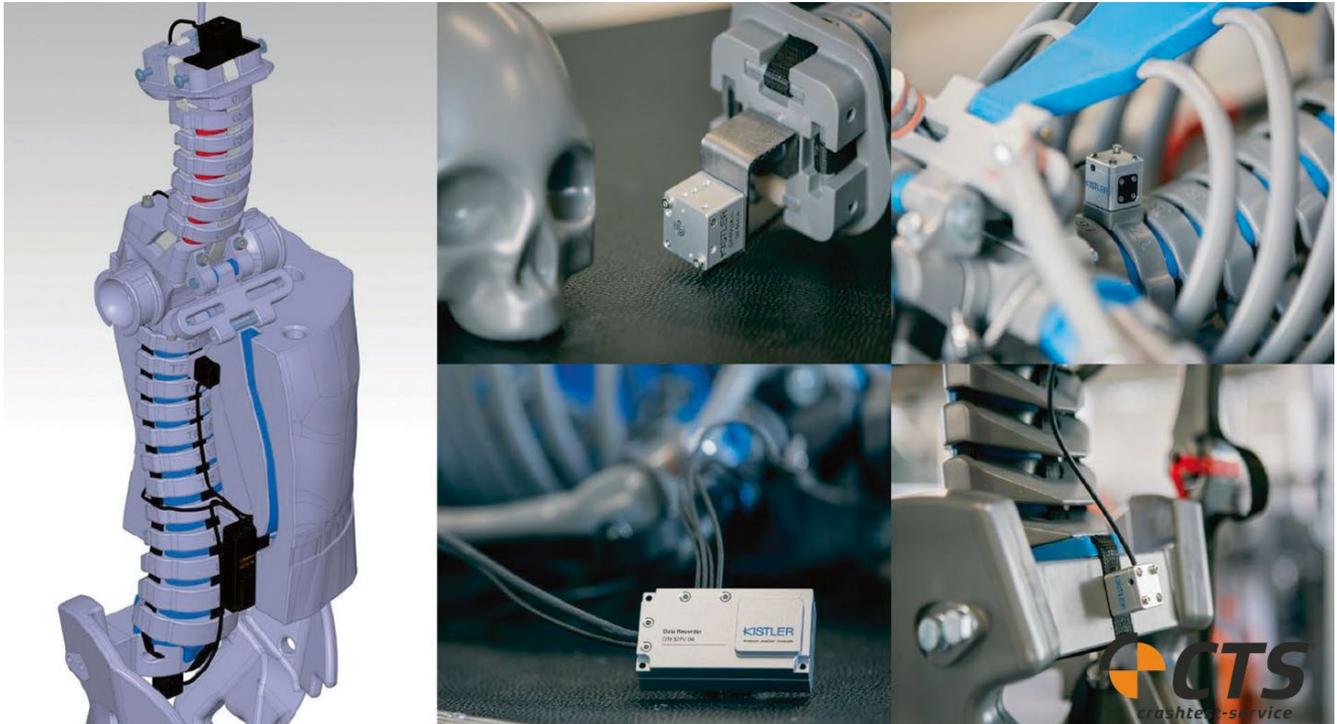
Bei stärkeren Kollisionen, die gegebenenfalls bereits zu einer Auslösung der Airbags führen können, liegen so gut wie keine Vergleiche mit Freiwilligen vor, da das Verletzungsrisiko zu groß ist. Seit kurzer Zeit können für solche

Versuche biofidele Dummies in der Unfallrekonstruktion eingesetzt werden, die neben ihrer menschenähnlichen Physiognomie und dem vergleichbaren Bewegungsverhalten auch mit Messtechnik ausgerüstet werden können. Die Beschleunigungsaufnahme erfolgt mit dreiaxialen Sensoren im Kopf, der Brust und der Hüfte mit einer Aufzeichnungsrate von 20.000 Hz, **BILD 1**. Der Abgleich zur Zellenbeschleunigung der Fahrgastzelle erfolgt über einen eigenen Sensor, dessen Werte mit denen der Sensoren im Dummy synchron aufgezeichnet werden.

## 2 War der Insasse ordnungsgemäß angegurtet?

Insbesondere bei stärkeren Frontalkollisionen (zum Beispiel ein Baumanprall mit 50 km/h) ergibt sich regelmäßig durch die Gerichte die Fragestellung, ob der Insasse ordnungsgemäß angegurtet war und wenn nicht, welche Verletzungen aufgetreten wären, wenn der Insasse ordnungsgemäß angegurtet gewesen wäre.

Stehen dem Sachverständigen Fotos von dem verunfallten Fahrzeug zur Verfügung, so kann gegebenenfalls durch die Position des Gurts oder eine Lenkradverformung bereits eine Aussage über die Gurtnutzung des Insassen betroffen werden. Ein straff an der B-Säule arretierter Gurt ist beispielsweise ein Anzeichen dafür, dass der Gurt zum Kollisionszeitpunkt nicht angelegt war und durch die Zündung des Gurtstrafers an der B-Säule gespannt wurde. Auch die Untersuchung des Gurts selbst bietet in Kombination mit der ermittelten kollisionsbedingten Geschwindig-



**BILD 1:** Positionierung der dreiaxialen Beschleunigungssensoren im PRIMUS

**FIGURE 1:** Positioning of the three-axial acceleration sensors in PRIMUS

keitsänderung nach Walter [7] einen Anhaltspunkt für die Gurtnutzung.

Liegen die entsprechenden Fotos nicht vor oder können nicht eindeutig ausgewertet werden, bleibt es dem medizinischen Sachverständigen vorbehalten, die Verletzungsschwere des Insassen in Bezug auf die Gurtnutzung zu beurteilen. Aus technischer Sicht wären daher öffentlich zugängliche Versuche wünschenswert, bei denen unter gleichen Bedingungen (Kollisionsgeschwindigkeit, Fahrzeugtyp, Anstoßkonstellation usw.) Frontalkollisionen durchgeführt und die Bewegung des Insassen und die Belastung in Abhängigkeit von der Gurtnutzung (angegurtet/nicht angegurtet) messtechnisch erfasst wurden. Ein direkter Vergleich zwischen einem angegurteten und nicht angegurteten Insassen wäre so möglich. Derartige Versuche standen bisher jedoch leider nicht zur Verfügung.

### 3 Aufbau der Versuchsreihe

Im Rahmen eines Forschungsprojektes bei der Firma [crashtest-service.com](http://crashtest-service.com)

GmbH (CTS) zur Validierung des biofidelen PRIMUS [8] war es erstmals möglich, in Kooperation mit dem Ingenieurbüro Schimmelpfennig + Becke eine Versuchsreihe zur oben genannten Thematik durchzuführen.

Es wurden drei Versuche durchgeführt, bei denen ein Ford Focus mit einer Geschwindigkeit von rund 50 km/h mit 40 % Überdeckung frontal gegen einen Baum gefahren wurde. Die Anstoßkonfiguration ist in **BILD 2** zu sehen. Auf dem Fahrersitz befand sich in allen drei Versuchen ein instrumentierter PRIMUS zur Bestimmung der Kopf-, Brust- und Hüftbeschleunigung im Kollisionsverlauf. Die Beschleunigung der Fahrgastzelle wurde mit einem zusätzlichen Sensor zwischen den Frontsitzen in der Mittelkonsole auf Höhe des Schwerpunkts aufgenommen und mit den Messdaten des Dummies korreliert.

Bei den Versuchen wurde nur der Grad der Gurtnutzung des Dummies variiert. Alle anderen Parameter blieben gleich. Die Unterschiede in der Gurtnutzung des Dummies sind in **BILD 3** dargestellt: nicht angegurtet,

Gurt neben der linken Schulter verlaufend und ordnungsgemäß angegurtet. Mit dem Fall des neben der Schulter verlaufenden Gurts sollte untersucht werden, inwieweit sich eine „schlechte beziehungsweise nicht ordnungsgemäße“ Gurtnutzung auf die Insassenbelastung auswirkt.

### 4 Durchführung und Auswertung

Das **BILD 4** zeigt die Bewegungsabläufe der Dummies bei der Kollision zu gleichen Zeitpunkten in einer Seitenansicht. Im roten Fahrzeug ist der Dummy nicht angegurtet, im silbernen Fahrzeug verläuft der Gurt neben der Schulter (im Weiteren als „schlecht angegurtet“ bezeichnet) und im blauen Fahrzeug wurde der Gurt ordnungsgemäß genutzt (im Weiteren als „gut angegurtet“ bezeichnet).

Ein deutlicher Unterschied in der Insassenbewegung ist im Fall eines nicht angegurteten Dummies (rotes Fahrzeug) zu erkennen. Der Dummy prallt ungebremst mit der Brust gegen das Lenkrad und stößt mit dem Kopf gegen die Dachkante und die Scheibe. Die

## 2.2. Unfallforschung



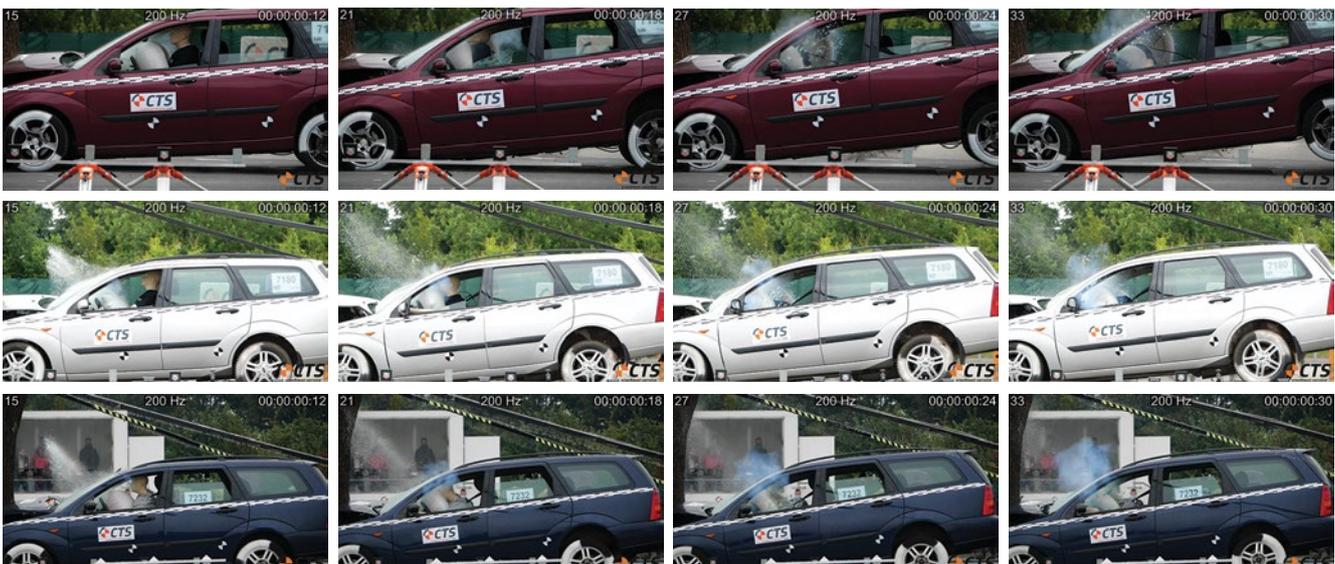
**BILD 2:** Anstoßkonfiguration der Versuchsreihe beim frontalen Baumanprall mit 40% Überdeckung (links) und verwendetem PRIMUS-Dummy im Fahrzeug (rechts)

**FIGURE 2:** Impact configuration of the test series in a frontal tree impact with 40% overlap (left) and PRIMUS dummy used in the vehicle (right)



**BILD 3:** Grad der Gurtnutzung bei den Versuchen: nicht angegurtet (links), Brustgurt neben der linken Schulter verlaufend (Mitte) und ordnungsgemäß angegurtet (rechts)

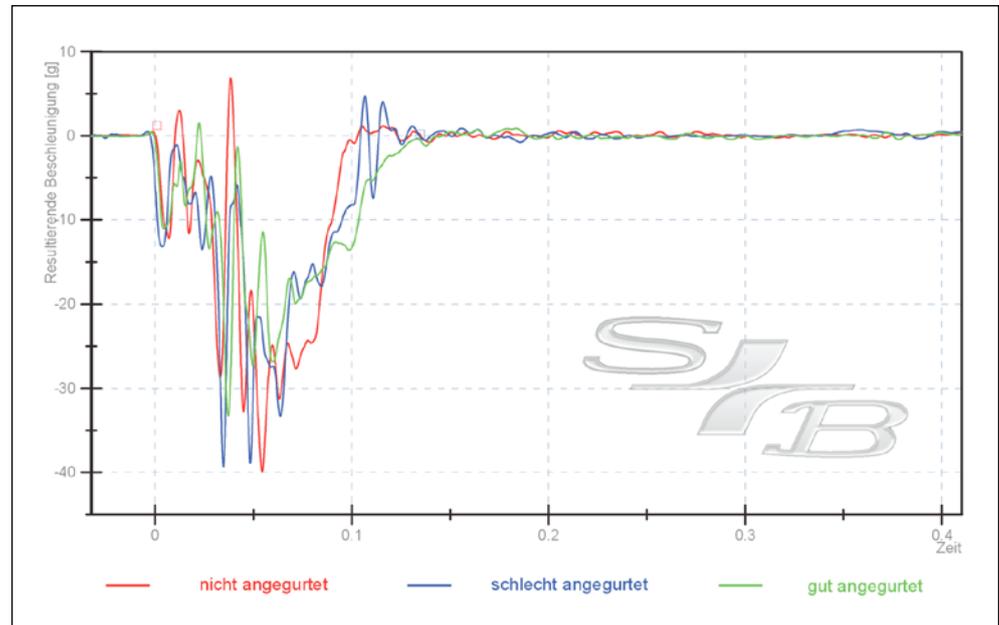
**FIGURE 3:** Degree of belt use during the tests: unbelted (left), chest belt running next to the left shoulder (centre) and properly belted (right)



**BILD 4:** Bewegungsablauf mit nicht angegurtetem (oben), schlecht angegurtetem (Mitte) und ordnungsgemäß angegurtetem PRIMUS (unten)

**FIGURE 4:** Movement sequence with unbelted (top), poorly belted (middle) and properly belted PRIMUS (bottom)

**BILD 5:** Beschleunigungsverläufe der Fahrgastzelle der Crashfahrzeuge in x-Richtung  
**FIGURE 5:** Acceleration curves of the passenger cell of the crash vehicles in the x-direction



**BILD 6:** Gegenüberstellung der Fahrzeugbeschädigungen aus der Versuchsreihe  
**FIGURE 6:** Comparison of the vehicle damage from the test series

Bewegungsabläufe des schlecht und des gut angegurten Dummies (silbernes und blaues Fahrzeug) sind optisch kaum voneinander zu unterscheiden. Der Oberkörper des Insassen wird augenscheinlich durch den Gurt zurückgehalten. Durch die Arretierung der Hüfte des Dummies mit Hilfe des Beckengurts kommt es zu einer Rotation des Oberkörpers nach vorne und unten, so dass der Dummy mit dem Kopf in den sich öffnenden Airbag stößt.

Dass die einzelnen Crashversuche direkt miteinander vergleichbar sind, zeigt die Gegenüberstellung des Beschleunigungsverlaufs der Fahrgastzelle in x-Richtung für alle drei Versuche im Diagramm, **BILD 5**. Für die Fahrgastzelle ergibt sich für alle drei Versuche eine kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung von rund 55 km/h. Auch

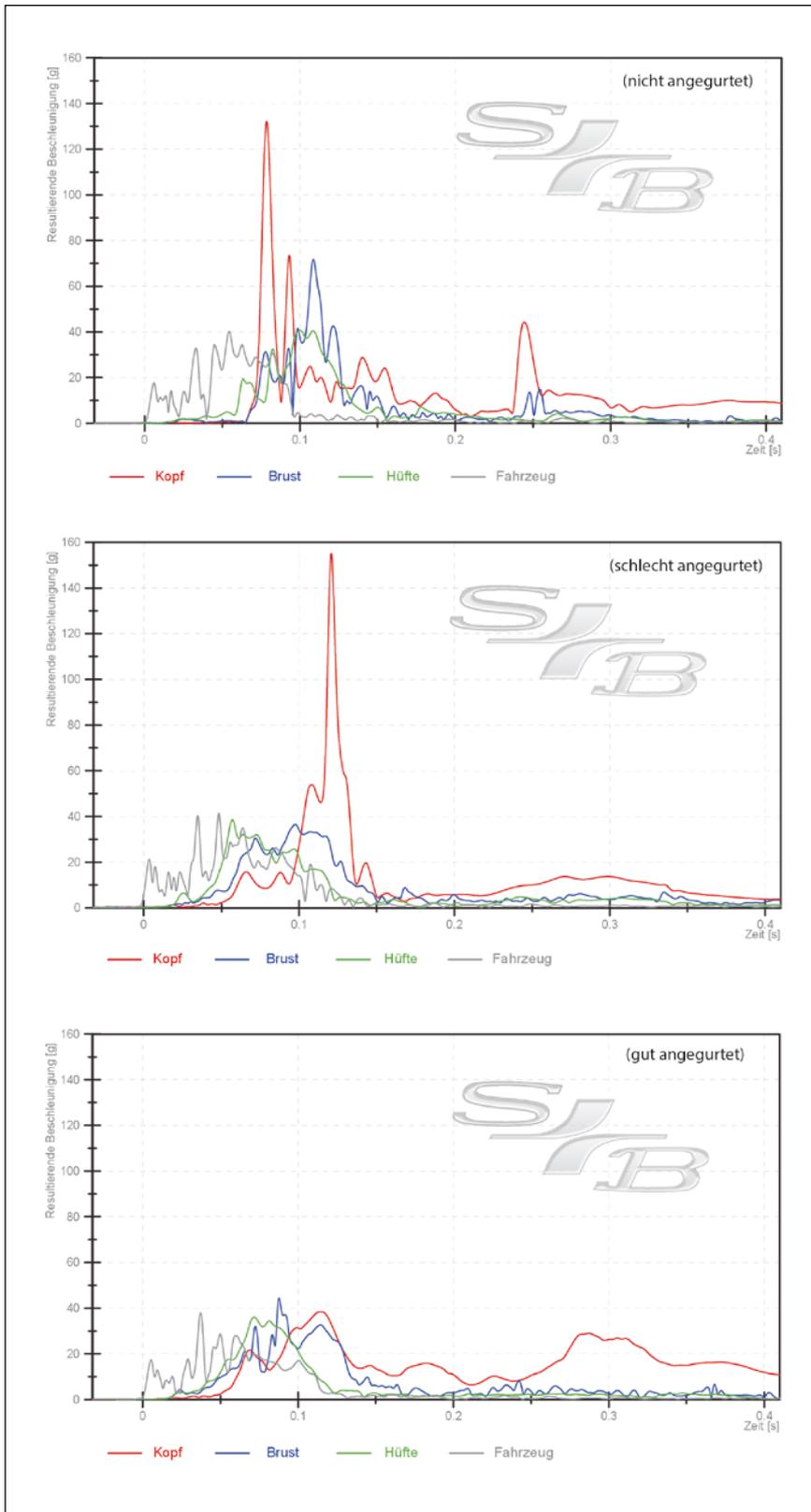
die Fahrzeugbeschädigungen stimmen optisch überein, **BILD 6**.

Die folgenden Diagramme sind CFC60 gefiltert (Channel Frequency Class). Die übliche CFC1000-Filterung für Kopfbeschleunigungen liefert für diese Untersuchung keine zusätzlich relevanten Informationen, so dass zur Veranschaulichung eine CFC60-Filterung gewählt wurde.

Da die Beschleunigungssensoren im Dummy und der Sensor der Fahrgastzelle über dieselbe Messeinheit erfasst werden, lassen sich die einzelnen Beschleunigungen zeitlich miteinander synchronisieren. Die resultierenden Beschleunigungsverläufe in den drei Versuchen sind in **BILD 7** einander gegenübergestellt worden. Dargestellt ist die Fahrgastzellenbeschleunigung (grau) im Verhältnis zur Kopf- (rot),

Brust- (blau) und Hüftbeschleunigung (grün). Die Beschleunigung ist in g angegeben ( $g=9,81 \text{ m/s}^2$ ).

Aus der Gegenüberstellung wird sofort ersichtlich, dass es bei einem nicht und einem schlecht angegurten Insassen zu hohen Kopfbeschleunigungen (besser ausgedrückt zu hohen Verzögerungen) kommt (roter Graph), die im Fall eines ordnungsgemäß angegurten Insassen nicht auftreten. Die Verzögerung des Insassen tritt zeitverzögert gegenüber der Verzögerung der Fahrgastzelle auf. Da der Insasse nur über den Gurt mit dem Fahrzeug verbunden ist. Die etwa 0,02 s später beginnende Verzögerung des Insassen im Falle eines angegurten Insassen kann durch die Gurtlose erklärt werden. Je geringer die Gurtlose ausfällt, desto früher nimmt der Insasse an der



**BILD 7:** Gegenüberstellung der resultierenden Beschleunigungen des Kopfs (rot), der Brust (blau), der Hüfte (grün) und der Fahrgastzelle (grau) für den unterschiedlichen Grad der Gurtnutzung durch den Insassen

**FIGURE 7:** Comparison of the resulting accelerations of the head (red), the chest (blue), the hip (green) and the passenger cell (grey) for the different degrees of belt use by the occupant

Änderung der Bewegung der Fahrgastzelle teil.

Bei einem nicht angegurteten Insassen kommt es erst durch den Aufprall des Insassen gegen das Lenkrad oder den Dachhimmel nach etwa 0,06 s zu einer Verzögerung des Körpers.

Bei der weiteren Analyse der Beschleunigungsverläufe erscheint es sinnvoll, die Beschleunigungen der einzelnen Körperregionen getrennt voneinander zu betrachten und unter Berücksichtigung des Grades der Gurtnutzung einander gegenüber zu stellen.

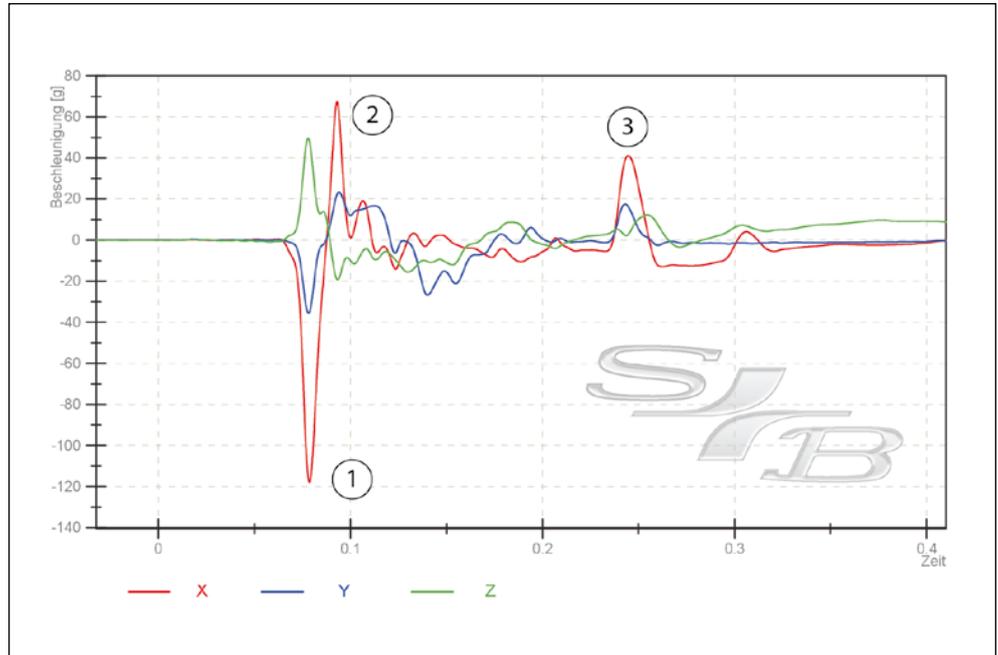
#### 4.1 Auswertung der Kopfbeschleunigung

Bevor die resultierenden Beschleunigungsverläufe des Kopfes der unterschiedlich angegurteten Insassen miteinander verglichen werden, lassen sich die auf den Kopf wirkenden Beschleunigungen zunächst für jeden Versuch in x-, y- und z-Richtung darstellen und mit der Bewegung des Insassen anhand der Einzelbilder korrelieren.

In **BILD 8** ist der Beschleunigungsverlauf des Kopfes des nicht angegurteten Insassen in x-, y- und z-Richtung graphisch gegen die Zeit aufgetragen worden. In x-Richtung (roter Graph) lassen sich drei markante Peaks identifizieren, die durchnummeriert wurden. Anhand des zeitlichen Verlaufs konnten die Peaks der Bewegung des Insassen zugeordnet werden, **BILD 9**). Der erste Peak entsteht durch den Anprall des Insassen mit der Stirn an die Dachkante. In einer Anstoßzeit von 0,023 s lässt sich aus dem Graphen eine mittlere Verzögerung von 46,36 g ( $454,79 \text{ m/s}^2$ ) ableiten. Die Integration der Beschleunigung über die extrem kurze Anstoßzeit führt zu einer kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung des Kopfes von 36 km/h. Alle weiteren Messwerte zu den Kollisionsdauern  $t$ , maximalen sowie mittleren Beschleunigungen ( $a_{max}$  beziehungsweise  $a_{mittel}$ ) und der kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung  $\Delta v$  sind in der **TABELLE** zur Übersicht zusammengefasst.

Nachfolgend kommt es zum Abknicken des Kopfes nach hinten, so dass der Insasse mit dem Gesicht gegen die Frontscheibe prallt (zweiter Peak). In dieser Phase tritt während einer Koll-

**BILD 8:** Kopfbeschleunigung des nicht angegurten Insassen in x-, y- und z-Richtung  
**FIGURE 8:** Head acceleration of the unbelted occupant in x, y and z directions



**BILD 9:** Mehrfacher Kopfanprall des nicht angegurten Insassen an die Dachkante (1), die Scheibe (2) und den Dachhimmel (3)  
**FIGURE 9:** Multiple head impacts of the unbelted occupant against the roof edge (1), the windscreen (2) and the roof lining (3)

**TABELLE:** Zusammenfassung der Messwerte und der daraus resultierenden Geschwindigkeitsänderungen für die Versuchsreihe  
**TABLE:** Summary of the measured values and the resulting speed changes for the test series

Gurt	Sensor	Richtung	t [ms]	a <sub>max</sub> [g]	a <sub>mittel</sub> [g]	a <sub>mittel</sub> [m/s <sup>2</sup> ]	ΔV [km/h]
nicht	Kopf	X (Dachkante)	23	-	46,36	454,79	36,00
		X (Scheibe)	23	-	23,14	227,00	18,72
		RES	-	-	-	-	-
	Brust	RES	87	71,71	25,06	245,84	76,74
	Hüfte	RES	155	-	6,65	65,24	36,38
	Fahrzeug	X	133	-	11,73	115,07	55,09
	RES	135	-	15,09	148,03	71,86	
schlecht	Kopf	X (Lenkrad)	94	-	14,27	139,99	47,32
		RES	102	155,14	30,04	294,69	108,40
	Brust	RES	140	36,60	15,50	152,06	76,64
	Hüfte	RES	155	-	13,03	127,82	71,34
	Fahrzeug	X	132	-	11,74	115,17	54,74
		RES	135	-	16,52	162,06	78,75
gut	Kopf	X (Airbag)	120	31,46	11,87	116,44	50,15
		RES	162	38,43	17,69	173,54	101,40
	Brust	RES	174	44,40	13,74	134,79	84,41
	Hüfte	RES	155	-	12,06	118,31	65,90
	Fahrzeug	X	132	-	11,66	114,38	54,39
		RES	134	-	13,47	132,14	63,75



**BILD 10:** Kopfbeschleunigung des schlecht angegurten Insassen in x-, y- und z-Richtung  
**FIGURE 10:** Head acceleration of the unbelted occupant in x-, y- and z-direction



**BILD 11:** Kopfanprall des schlecht angegurten Insassen gegen den Airbag (1) und auf das Lenkrad (2)  
**FIGURE 11:** Head impact of the poorly belted occupant against the airbag (1) and the steering wheel (2)

lisionsdauer von ebenfalls 0,23 s eine mittlere Beschleunigung von 23,14 g ( $227,00 \text{ m/s}^2$ ) auf, entsprechend einer kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung von 18,72 km/h.

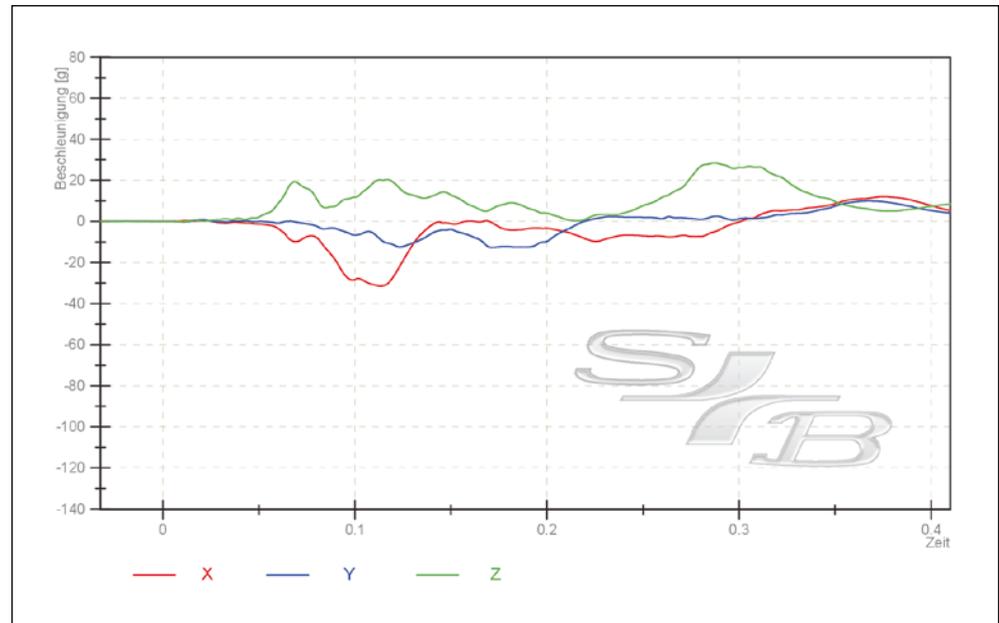
Nach dem Scheibenkontakt prallt der Insasse wieder zurück in den Fahrzeuginnenraum und stößt bei rund 0,25 s nach Kollisionsbeginn mit dem Kopf von unten gegen den Dachhimmel (dritter Peak).

Eine vergleichbare Auswertung der Zuteilung der Beschleunigungsspitzen zur Insassenbewegung ist für den schlecht angegurten Insassen mit dem Diagramm in **BILD 10** und der da-

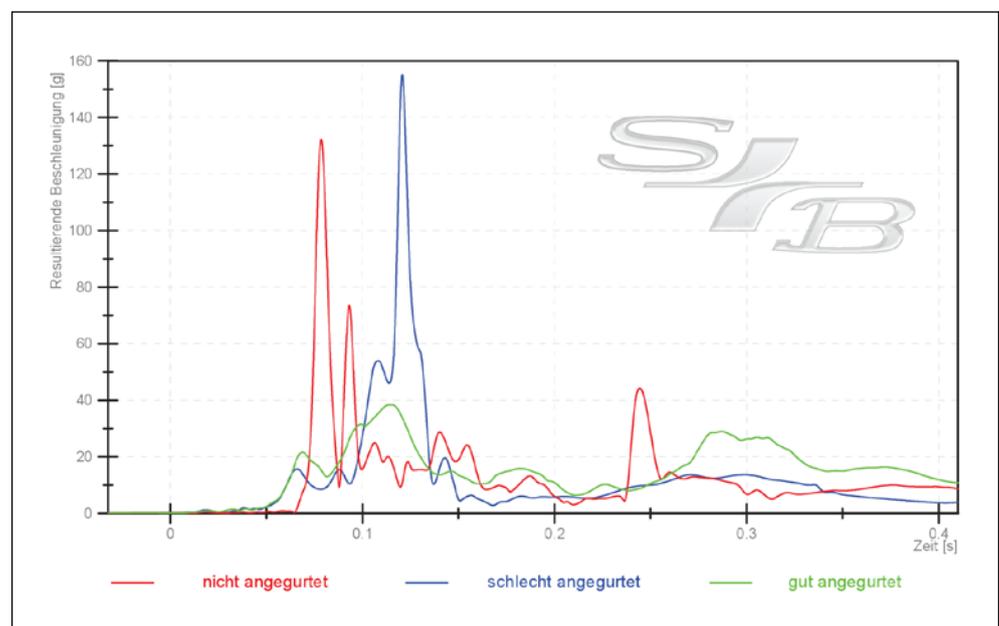
zu gehörigen Insassenbewegung mit **BILD 11** dargestellt. Der erste Peak entsteht durch die Abbremsung der Kopfbewegung aufgrund des Airbags nach etwa 0,1 s. Weitere 0,02 s später wird der Kopf massiv verzögert. Es kommt zum Aufprall des Kopfs auf das Lenkrad, obwohl der Airbag gezündet wurde und der Insasse zumindest den Beckengurt vollständig und den Brustgurt teilweise nutzt. Die dabei im Mittel auftretenden Beschleunigungen stellen nur etwa ein Drittel der Beschleunigungen des nicht angegurten Insassen beim Kopfanprall an die Dachkante dar ( $14,27 \text{ g} / 139 \text{ m/s}^2$ ), siehe Bild 8.

Stellt man den Beschleunigungsverlauf des Kopfs bei einem ordnungsgemäß angegurten Insassen dar (**BILD 12**), so ergeben sich keine kurzzeitigen starken Anstiege der Beschleunigung wie bei einem nicht angegurten oder schlecht angegurten Insassen. Vielmehr ist zu erkennen, dass der Kopf lediglich Verzögerungen von bis zu 32 g erfährt. Insgesamt wird der Kopf über eine verhältnismäßig lange Zeitdauer von 0,12 s verzögert. Die verlängerte Verzögerungszeit wird durch das Zusammenspiel des Airbags mit dem Brustgurt erreicht. Die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung

**BILD 12:** Kopfbeschleunigung des ordnungsgemäß angegurten Insassen in x-, y- und z-Richtung  
**FIGURE 12:** Head acceleration of the properly belted occupant in x-, y- and z-direction



**BILD 13:** Gegenüberstellung der resultierenden Kopfbeschleunigung in Abhängigkeit vom Grad der Gurtnutzung  
**FIGURE 13:** Comparison of the resulting head acceleration as a function of the degree of seat belt use



mit 50,15 km/h ist vergleichbar mit dem Kopfanprall auf das Lenkrad im schlecht angegurten Fall. Allerdings ergibt sich durch die längere Einwirkdauer eine geringere mittlere Verzögerung von 11,87 g (116,44 m/s<sup>2</sup>).

Die Gegenüberstellung der resultierenden Beschleunigungen des Kopfs in Abhängigkeit von der Gurtnutzung zeigt **BILD 13**. Der Airbag allein reicht nicht aus, um den Kopf „sanft“ abzubremsen.

Wird der Oberkörper nicht zusätzlich durch den Brustgurt ausreichend zurückgehalten, schlägt der Kopf trotz des gezündeten Airbags auf das Lenkrad auf.

In **BILD 14** ist der Wertebereich für die Beschleunigung von Kollisionsbeginn bis 0,2s vergrößert dargestellt. Der Beschleunigungsverlauf des Kopfs für einen schlecht (blau) und einen gut (grün) angegurten Insassen verläuft bis 0,1s nach der Kollision in guter Näherung

gleich. Danach rutscht der Brustgurt des schlecht angegurten Insassen weiter von dessen linker Schulter ab, so dass der Gurt den Oberkörper nicht mehr ausreichend zurückhält (magenta gekennzeichnet). Während der Kopf des gut angegurten Dummies nur noch geringfügig stärker verzögert wird, kollabiert der Airbag im Fall eines schlecht angegurten Dummies, da der Airbag den Kopf und die Brust nicht gleichzei-

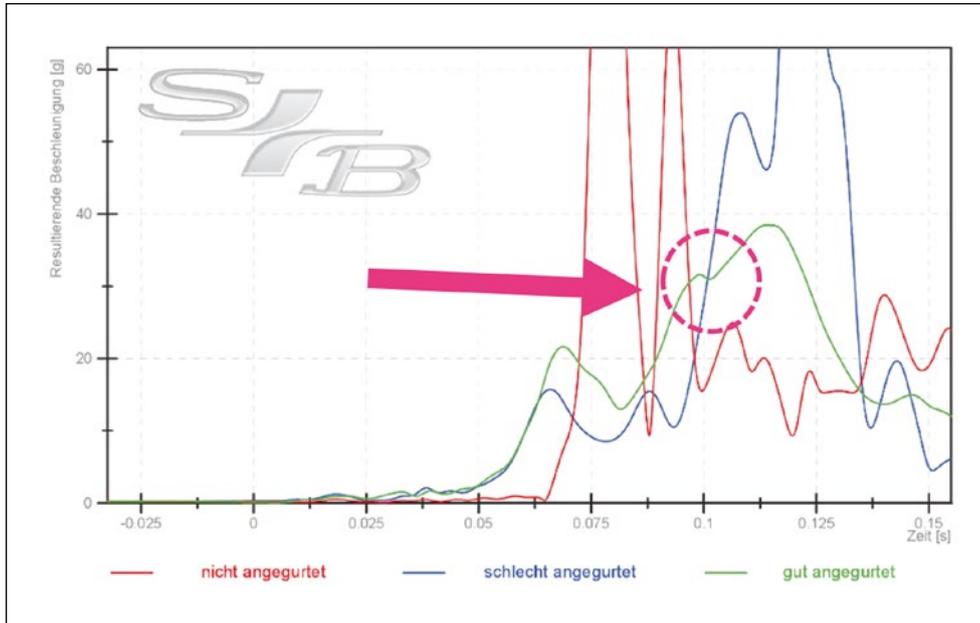


BILD 14: Vergrößerter Ausschnitt aus Bild 13

FIGURE 14: Enlarged section of Figure 13



BILD 15: Erhebliche Kopfverdrrehung beim Eintauchen in den Airbag (gut angegurter Insasse)

FIGURE 15: Significant head torsion when immersed in the airbag (well belted occupant)

tig effektiv abbremsen kann. Es kommt zum Kopfanprall auf das Lenkrad.

Wertet man die Höhe der resultierenden kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung des Kopfs für den schlecht und den gut angegurten Insassen aus, so zeigt sich, dass in beiden Fällen der Kopf etwa eine kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung von  $105 \pm 3,5 \text{ km/h}$  erfährt. Die aufgetretene Maximalbeschleunigung  $a_{max}$  ist im schlecht angegurten Fall jedoch etwa 4-mal so groß, die mittlere Beschleunigung  $a_{mittel}$  etwa 2-mal so groß.

#### 4.2 Kopfdrehung beim Eintauchen in den Airbag

Das Diagramm in Bild 12 hat gezeigt, dass trotz Frontalkollision auch Verzögerungen in y- und z-Richtung auf

den Insassen wirken, die teilweise vergleichbar groß sein können. Die Erklärung ergibt sich aus der Kopfbewegung des Insassen, die im korrekt angegurten Fall mit einer OnBoard-Kamera aufgenommen wurde, BILD 15.

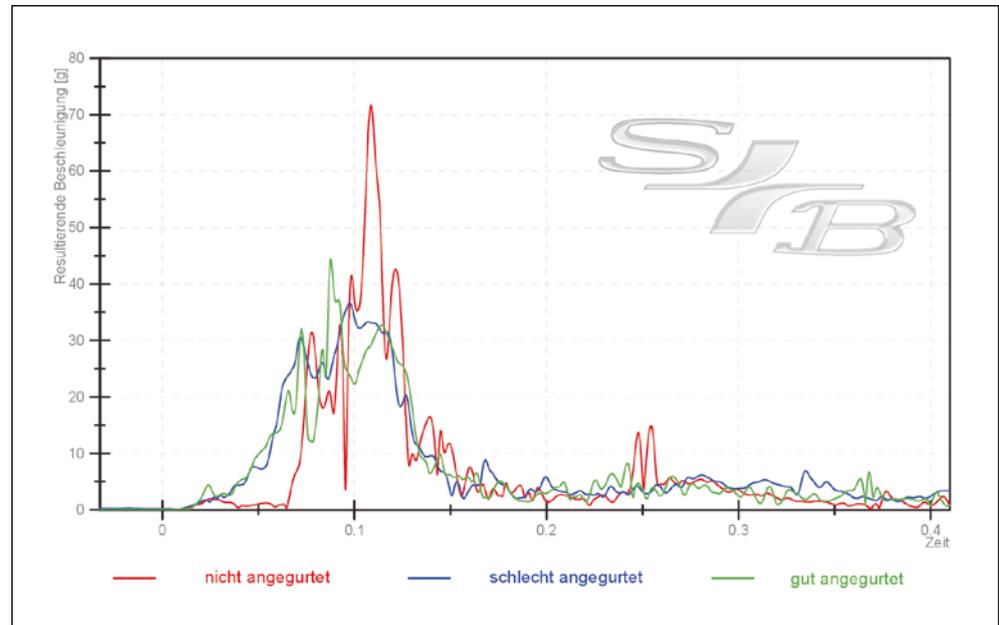
Beim Eintauchen des Kopfs in den Airbag kommt es zu einer erheblichen Rotation des Kopfs. Auf den Einzelbildern ist zu erkennen, dass die linke Schulter des Insassen durch den über der Schulter verlaufenden Gurt zurückgehalten wird. Die rechte Schulter schwingt nach vorne, wodurch es unter anderem zu einer Rotation im Oberkörper kommt. Der Kopf folgt dieser Rotationsbewegung, so dass der Kopf nicht mehr ausschließlich frontal durch den Airbag verzögert wird, sondern auch die rechte Seite.

#### 4.3 Auswertung der Brustbeschleunigung

Mit dem Diagramm in BILD 16 ist der resultierende Beschleunigungsverlauf der Brust in Abhängigkeit von der Gurtnutzung aufgetragen worden. Der Beschleunigungsverlauf beim schlecht angegurten Dummy (blau) gegenüber dem gut angegurten Dummy (grün) unterscheidet sich kaum. Der Insasse wird im Wesentlichen durch den Beckengurt gehalten und kann mit dem Oberkörper, unabhängig vom Sitz des Brustgurts, das Lenkrad nicht erreichen. Es treten maximale Verzögerungen im Bereich von 35 bis 44 g auf. Bei einer Einwirkdauer von 0,14 beziehungsweise 0,17 s ergibt sich bei einer mittleren Beschleunigung von 15,50 beziehungsweise 13,74 g eine kollisionsbedingte

**BILD 16:** Gegenüberstellung der resultierenden Brustbeschleunigung in Abhängigkeit vom Grad der Gurtnutzung

**FIGURE 16:** Comparison of the resulting chest acceleration as a function of the degree of seat belt usage



**BILD 17:** Brustbeschleunigung des nicht angegurten Insassen in x-, y- und z-Richtung

**FIGURE 17:** Chest acceleration of the unbelted occupant in x-, y- and z-direction



Geschwindigkeitsänderung von 76,64 beziehungsweise 84,41 km/h.

Im nicht angegurten Fall bewegt sich der Insasse frei im Fahrzeug nach vorn. Daher setzt die Verzögerung des Oberkörpers deutlich zeitversetzt im Vergleich zum angegurten Insassen ein. In **BILD 17** ist der Beschleunigungsverlauf der Brust des nicht angegurten Insassen in die einzelnen Raumrichtungen zerlegt. In x-Richtung (roter Graph) ergeben sich

zwei charakteristische Verzögerungspeaks. Der erste Peak lässt sich dem Anprall an den Airbag zuordnen, (**BILD 18**). Kurze Zeit später kollabiert der Airbag und die Brust prallt gegen das Lenkrad (zweiter Peak). Beim Anprall an das Lenkrad erfährt der Insasse eine resultierende kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung von 76,74 km/h, Bild 16. Die Geschwindigkeitsänderung ist somit vergleichbar zur Geschwindigkeitsände-

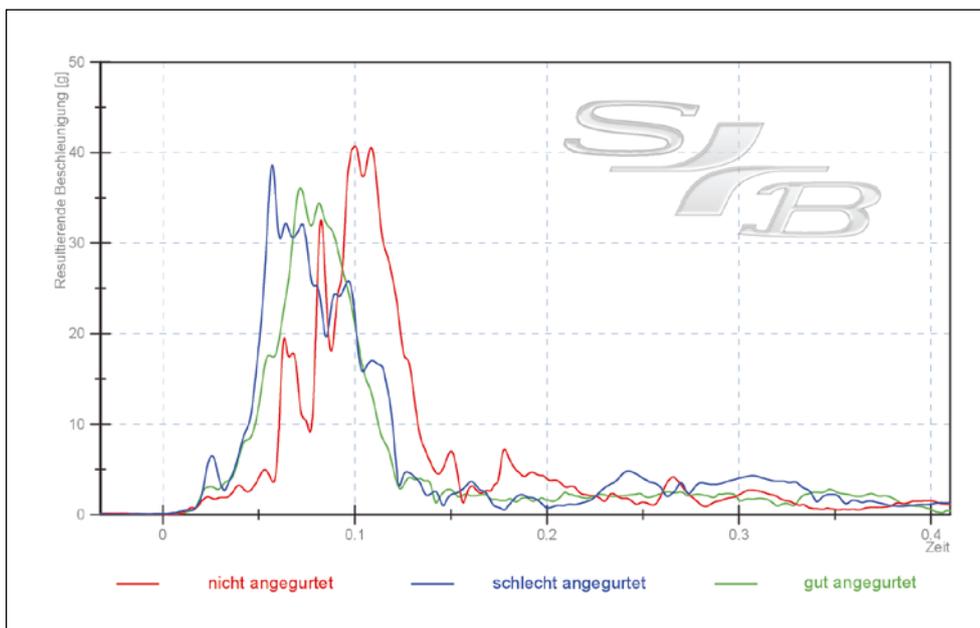
rung im Fall eines angegurten Insassen. Allerdings ist beim Lenkradanprall die maximale Verzögerung etwa 2-mal so groß und die Einwirkdauer der Beschleunigung entsprechend gering.

#### 4.4 Auswertung der Hüftbeschleunigung

Wie zu erwarten, liegt ebenfalls kein nennenswerter Unterschied in der resultierenden Hüftbeschleunigung des



**BILD 18:** Brustanprall des nicht angegurten Insassen gegen den Airbag (1) und auf das Lenkrad (2)  
**FIGURE 18:** Chest impact of the unbelted occupant against the airbag (1) and on the steering wheel (2)



**BILD 19:** Gegenüberstellung der resultierenden Hüftbeschleunigung in Abhängigkeit vom Grad der Gurtnutzung  
**FIGURE 19:** Comparison of the resulting hip acceleration as a function of the degree of seat belt use

Dummys in Abhängigkeit von der Position des Brustgurtes vor (BILD 19 blauer/grüner Graph), da beide Dummys gleichermaßen mit dem Beckengurt gesichert sind. Mit 71,34 beziehungsweise 65,90 km/h liegt die resultierende kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung der Hüfte im Bereich der resultierenden kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderung der Fahrgastzelle (78,75 beziehungsweise 63,75 km/h), da die Hüfte über den Beckengurt, bis auf eine geringe Gurtlose, direkt mit dem Fahrzeug verbunden ist.

Im Falle eines nicht angegurten Insassen kommt es zu einer zeitverzögerten Abbremsung der Hüfte, da die

Hüfte nicht direkt über den Beckengurt abgebremst wird, sondern durch den Aufprall der Brust auf den Airbag und anschließend auf das Lenkrad die Verzögerung erfolgt. Da der Dummy im nicht angegurten Fall nicht direkt mit der Hüfte gegen das Fahrzeug prallt, liegt auch hier nur eine resultierende kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung der Hüfte von 36,38 km/h vor.

### 5 Vergleich des Verletzungsbildes

Aufgrund der Biofidelität des eingesetzten PRIMUS war es nicht nur möglich, die Beschleunigungsverläufe der

einzelnen Körperbereiche aufzunehmen, vielmehr lässt sich nach dem Versuch auch das Verletzungsausmaß für den Insassen bei einer „Autopsie“ des Dummys durchführen.

Beim nicht angegurten Insassen konnte eine massive Überdehnung der Halswirbelsäule und der Bruch einiger Brustwirbel festgestellt werden, BILD 20. Die Überdehnung der Halswirbelsäule ergab sich schon aus den vorherigen Bewegungsabläufen (Bild 4 beziehungsweise Bild 9). Im Vergleich hierzu wies der schlecht angegurte Dummy zwei linksseitige Rippenbrüche, Ellbogengelenksverletzungen rechts und Bänderdehnungen in beiden Knien auf, BILD 21.



BILD 20: Verletzungen des nicht angegurten PRIMUS  
 FIGURE 20: Injuries of the unbelted PRIMUS



BILD 21: Verletzungen des schlecht angegurten PRIMUS  
 FIGURE 21: Injuries of the poorly belted PRIMUS

Aus den Gegenüberstellungen der Verletzungen des nicht und des schlecht angegurten Dummies zeigt sich, dass nicht nur die Höhe der aufgetretenen Belastung von Bedeutung ist. Obwohl sich die Einwirkdauer und die Höhe der

Beschleunigung deutlich unterscheiden, war die resultierende kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung des Kopfs in beiden Versuchen annähernd gleich. Die Richtung der einwirkenden Kraft führte aber beim nicht

angegurten Dummy zur Überdehnung der HWS, während der Dummy im schlecht angegurten Fall flach mit dem Kopf in den Airbag eintauchte und auf das Lenkrad prallte, ohne dass es zu einer erheblichen Überdehnung der



**BILD 22:** Verletzungen des ordnungsgemäß angegurten PRIMUS  
**FIGURE 22:** Injuries of the properly belted PRIMUS

HWS kam. Die Verletzungen des ordnungsgemäß angegurten PRIMUS sind mit **BILD 22** dargestellt. Durch die Kollision kam es zu zwei gebrochenen Rippen auf der linken Seite und einer Sternum-Fraktur.

### 6 Zusammenfassung

Durch den Einsatz instrumentierter, biofideler PRIMUS-Dummys ist es für die Unfallrekonstruktion nun möglich, die direkt auf den Insassen wirkenden Belastungen auch bei stärkeren Kollisionen zu erfassen, bei denen aus Sicherheitsgründen keine Freiwilligenversuche mehr durchgeführt werden können.

Zusätzlich lässt sich durch eine spätere „Autopsie“ des Dummys das Verletzungsbild in Form von Knochenbrüchen, Bänderdehnungen usw. auch für den technischen Laien nachvollziehbar dokumentieren.

Die durchgeführte Versuchsreihe zum Frontalanprall eines Ford Focus mit 50 km/h hat gezeigt, dass die ordnungsgemäße Nutzung des Brustgurts für die Reduzierung der Insassenbelastung erheblich ist. Wird der Gurt nicht richtig über der Schulter getragen und kommt es zum Abrutschen des Gurts während der Kollision, so ist der Airbag nicht mehr in der Lage, den Kopf ausreißend abzubremsen. Der Insasse schlägt im Kollisionsverlauf trotz gezündetem Airbag mit dem Kopf auf das Lenkrad. Im Falle eines ordnungsgemäß verwendeten Brustgurts wird der Oberkörper so weit zurückgehalten, dass der Kopf durch den Airbag möglichst lange bei einem geringeren Verzögerungsniveau abgebremst wird. Die resultierende kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung des Kopfs beim Kopfanprall auf das Lenkrad und beim Abbremsen durch den Airbag ist mit  $105 \pm 3,5$  km/h vergleichbar.

Die Einwirkdauer und Höhe der Beschleunigung unterscheiden sich jedoch erheblich.

Aus den Gegenüberstellungen der Verletzungen des nicht und des schlecht angegurten Dummys zeigt sich, dass nicht nur die Höhe der aufgetretenen Belastung von Bedeutung ist. Obwohl sich die Einwirkdauer und die Höhe der Beschleunigung deutlich unterscheiden, war die resultierende kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung des Kopfs in beiden Versuchen annähernd gleich. Die Richtung der einwirkenden Kraft führte jedoch beim nicht angegurten Dummy zur Überdehnung der HWS, währenddessen der Dummy im schlecht angegurten Fall flach mit dem Kopf in den Airbag eintauchte und auf das Lenkrad prallte, ohne dass es zu einer erheblichen Verdrehung der Halswirbelsäule kam.

Die Auswertung hat gezeigt, dass trotz Frontalkollision auch Verzöger-

rungen in y- und z-Richtung auf den Insassen im Kopfbereich wirken, die teilweise vergleichbar groß sein können. Die Erklärung ergibt sich aus der Kopfbewegung des Insassen, die durch das Zurückhalten der linken Schulter aufgrund des Brustgurts eingeleitet wird.

Wie zu erwarten, fällt die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung der Hüfte in etwa genau so groß aus wie die der Fahrgastzelle, da der angegurtete Insasse durch den Beckengurt bis auf eine geringe Gurtlose mit dem Fahrzeug verbunden ist.

## 7 Ausblick

Bei der Beurteilung der biomechanischen Belastung eines Insassen bei einer Frontalkollision kommt es gelegentlich vor, dass im Fall der Frontairbag während der Kollision gezündet wurde. Bisher liegen noch keine vergleichenden Messungen vor, inwieweit der Airbag die Belastung des Kopfs bei einer Frontalkollision verringert. Bisher muss sich der technische Sachverständige darauf beschränken, anhand der Fahrzeugbeschädigungen die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung der Fahrgastzelle als Maß für die biomechanische Insassenbelastung zu bestimmen.

Durch den Einsatz eines instrumentierten PRIMUS bei Crashversuchen mit Frontalkollision und Teilzündung

der Frontairbags wird es in Zukunft unter anderem möglich sein, die Höhe des Einflusses des Airbags auf die biomechanische Belastung angeben zu können.

Ich danke der Firma crashtest-service.com GmbH für die gute Zusammenarbeit und insbesondere Herrn Dr. Dobberstein für die umfangreiche und schnelle Auswertung der zahlreichen Messdaten.

## Literaturhinweise

- [1] C. J. G. Castro, M. F. Hein, W. Kalthoff, M. Becke, L. Gorny, H. Wagner, W. H. M. Castro, Bewegungsanalyse und Bewertung des Verletzungsrisikos von Insassen bei Seitenkollisionen – Erkenntnisse aus Crashtests beim fahrenden Pkw, VKU 11/2015.
- [2] S. Meyer, I. Mazzotti, M. Becke, HWS-Belastungen beim Heckanstoß – Erkenntnisse zur Schutzhaltung für Pkw-Insassen, VKU 01/2018.
- [3] B. Walter, M. Winninghoff, M. Becke, Gurtschlitten – aktualisierte Untersuchung der biomechanischen Belastung, VKU 03/2007.
- [4] M. Becke, Heckkollision – Ist delta v out?, UREKO Spiegel (03) 2002.
- [5] S. Meyer, M. Weber, W. Kalthoff, M. Schilgen, W. H. M. Castro, Freiwilligen-Versuche zur Belastung der Halswirbelsäule durch Pkw-Heckanstöße, VKU 01/1999.
- [6] S. Meyer, Experimentelle Untersuchung des Zusammenhangs zwischen technischen Kollisionsparametern und der Bewegungskinetik von Insassen im Hinblick auf leichte HWS-Schleudertraumen,

Diplomarbeit Universität Hannover, 1993.

- [7] B. Walter, Belastungsspuren an Sicherheitsgurten, VKU 04/2008.
- [8] Namensgebung für den biofidelen Dummy durch die Firma crashtest-service.com GmbH.

### Comparison of occupant loads in frontal collisions with different degrees of seat belt use

*The biomechanical loading of an occupant in a frontal collision is not only linked to the cell acceleration of the passenger cell. In frontal collisions with airbag deployment, there is an interaction between the belt and the airbag to reduce relative forward movement of the occupant in the vehicle and to minimise the risk of impact with the vehicle interior. The loads that occur on the head, chest and hip of an occupant in the collision described above and the extent to which the improper use of the seat belt has an influence on the biomechanical load have not yet been investigated by accident reconstruction experts. For this reason, a series of tests was carried out in which a Ford Focus collided head-on with a tree at 50 km/h and the collision-related acceleration curve for the driver was recorded by using biofidel dummies equipped with measuring technology. In the total of three tests, the dummy on the driver's seat was initially not wearing a seat belt, in the second test the chest belt ran next to the left shoulder before the collision and in the last test the three-point safety belt was used as prescribed. The results obtained are discussed and compared for the degree of belt use.*

#### \* Autorin

Dipl.-Phys. Annika Kortmann ist Sachverständige für Straßenverkehrsunfälle im Ingenieurbüro S+B in Münster. ::