

# Gurtschlitten – aktualisierte Untersuchung der biomechanischen Belastung

Von Burkhard Walter, Markus Winninghoff und Manfred Becke\*

**Gurtschlitten sollen die Belastung von Pkw-Insassen beim Frontalanprall veranschaulichen. Dazu müssen neben den Beschleunigungen beim Aufprall auch die biomechanischen Belastungswerte mit denen realer Unfälle vergleichbar sein. In einer Versuchsreihe des Ingenieurbüros Schimmel-pennig + Becke wurden Gurtschlittenversuche sowie ein Pkw-Frontalaufprall durchgeführt. Messergebnisse und Bewegungsanalysen werden verglichen.**

## 1 Einleitung

Ein Betätigungsfeld des Sachverständigen für Straßenverkehrsunfälle ist die Analyse von Kollisionen hinsichtlich der biomechanischen Belastung, wenn es darum geht, zu beurteilen, ob ein Unfall geeignet war, zum Beispiel ein sogenanntes „HWS-Schleudertrauma“ hervorzurufen. Um die berechneten Werte für die Beteiligten des Verfahrens und den medizinischen Sachverständigen zu verdeutlichen, bietet es sich dabei an, anschauliche Beispiele heranzuziehen. Für Frontalkollisionen steht hier der Gurtschlitten an erster Stelle. Die bei den meist verbreiteten Gurtschlitten, die nach dem Prinzip der schiefen Ebene aufgebaut sind, auftretenden Verzögerungen wurden bereits in [1] und [2] beschrieben.

Aufgrund der technischen Ausführung des unteren Schlittenan-schlags kommt es dort zu äußerst hohen Verzögerungen des Schlittens und damit des Sitzgestells von bis zu 21 g innerhalb einer sehr kurzen Kollisionsdauer. Diese Werte ließen sich nicht ohne weiteres auf eine Pkw-Kollision übertragen, wengleich die zu beobachtende Bewegung des Probanden eine gute Analogie offenbarte. Daher wurde die These aufgestellt, dass auch die biomechanischen Belastungen vergleichbar sind, sodass die Gurtschlittenversuche für die Veranschaulichung herangezogen werden können.

Nun soll die Untersuchung der auf die Probanden selbst einwirkenden Belastungen vorgestellt werden.

## 2 Versuchsaufbau

Für die Versuche stand der Gurtschlitten der Verkehrswacht Dortmund zur Verfügung, bei dem zuvor die kürzeste Kollisionsdauer und damit höchste Sitzgestellverzögerung gemessen wurde. Der Anschlag ist an diesem Gurtschlitten mit acht zylindrischen Gummipuffern ausgeführt, die den Schlitten beim Anprall am unteren Rahmenquerholm schlagartig abbremsen, **BILD 1** und **BILD 2**.

Um den Crashpuls dem einer Pkw-Kollision anzugleichen, war die Kollisionsdauer zu verlängern, d. h. die Abbremsung des Schlittens musste innerhalb einer größeren Wegstrecke stattfinden, wodurch sich gleichzeitig die Verzögerung verringerte. Hierfür wurden zwei Gummilagen und ein EPP (Expandiertes Poly-Propylen)-Quader eingefügt. Dieses Material, das auch in reversiblen Stoßfängern zum Einsatz kommt, verfügt über die gewünschten Dämpfungseigenschaften. Der modifizierte Anschlag ist in **BILD 3** zu erkennen. Durch die veränderte Kollisionscharakteristik kam es auch zu etwas



**BILD 1:** Gurtschlitten der Verkehrswacht Dortmund



**BILD 2:** Ursprünglicher Anschlag des Gurtschlittens



BILD 3: Modifizierter Gurtschlittenansschlag

geringeren Geschwindigkeitsänderungen, da dieser besser gedämpfte Anschlag eine geringere Elastizität im Kollisionsverlauf hervorruft. Dies zeigt sich daran, dass der Schlitten mit dem Dämpfungsteil weniger zurückschnellt. Wesentliche Versuchsdaten sind TABELLE 1 zu entnehmen.

Insgesamt wurden 11 Versuche durchgeführt, davon jeweils fünf mit den beiden Anprallvarianten und zum Vergleich eine Pkw-Barrieren-Kollision. Die kollisionsbedingten Geschwindigkeitsänderungen

lagen zwischen 10,5 km/h und 13,2 km/h.

Eine Videokamera mit einer Aufzeichnungsfrequenz von 100 Hz diente bei den Versuchen zur Aufzeichnung der Bewegungsabläufe, wobei sich herausstellte, dass die Bewegungsabläufe zeitlich so ausge dehnt sind, dass man auch mit einer geringeren Frequenz einen guten Eindruck von den Bewegungen erhält. Gleichzeitig wurden die Brust- und Kopfbeschleunigungen der Probanden nebst der Schlittenver

zögerung mit einem Transientenrekorder aufgezeichnet, der mit einem Ringspeicher arbeitet, um auch die Messwerte vor einem Triggerereignis (Beschleunigungsschwelle) aufzeichnen zu können. Redundant wurden die Schlittenverzögerungen auch mit einem UDS (Unfalldatenspeicher) gemessen, da dieser bei der ersten Untersuchung [1] auch Anwendung fand.

### 3 Versuchsergebnisse

In dem Diagramm in BILD 4 sind drei verschiedene Beschleunigungsverläufe dargestellt. Dabei handelt es sich bei der dünn gestrichelten Linie um den Beschleunigungsverlauf des „normalen“ Schlittens. Die dick gestrichelte Linie beschreibt den Beschleunigungsverlauf des modifizierten Schlittens. Hier wurde eine Kollisionsdauer von 0,10 s realisiert. Zum Vergleich beschreibt die durchgezogene Linie den Beschleunigungsverlauf eines Pkw-Anpralls an eine feststehende Barriere. Hier war eine Kollisionsdauer von 0,11 s zu notieren.

Die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung, die auf den Freiwilligen einwirkte, lag bei 12,6 km/h (normaler Gurtschlitten) und bei

TABELLE 1: Messwerte

		„normaler“ Gurtschlitten			modifizierter Gurtschlitten			Pkw/Barriere		
		a [m/s <sup>2</sup> ]	t [s]	$\Delta v_{\text{Schlitten}}$ [km/h]	a [m/s <sup>2</sup> ]	t [s]	$\Delta v_{\text{Schlitten}}$ [km/h]	a [m/s <sup>2</sup> ]	t [s]	$\Delta v_{\text{Pkw}}$ [km/h]
Proband I	Schlitten (x)	198,3	0,02	12,9	29,6	0,10	10,5			
	Brust (x)	20,0	0,09		32,2	0,09				
	Kopf (x)	30,5	0,12		23,8	0,21				
Proband II	Schlitten	167,7	0,02	12,1	30,1	0,10	10,8			
	Brust (x)	15,3	0,13		15,3	0,13				
	Kopf (x)	27,4	0,11		17,5	0,2				
Proband III	Schlitten (x)	175,5	0,02	12,6	30,8	0,10	11,3	26,2	0,11	12,1
	Brust (x)	33,6	0,08		30,3	0,11		16,9	0,17	
	Kopf (x)	29,4	0,15		15,7	0,29		11,8	0,33	
Proband IV	Schlitten (x)	194,5	0,02	12,6	29,7	0,10	11,0			
	Brust (x)	41,2	0,08		43,8	0,08				
	Kopf (x)	37,7	0,14		35,6	0,16				
Proband V	Schlitten (x)	182,6	0,02	13,2	31,4	0,10	11,5			
	Brust (x)	32,3	0,10		27,1	0,14				
	Kopf (x)	24,3	0,25		20,1	0,32				

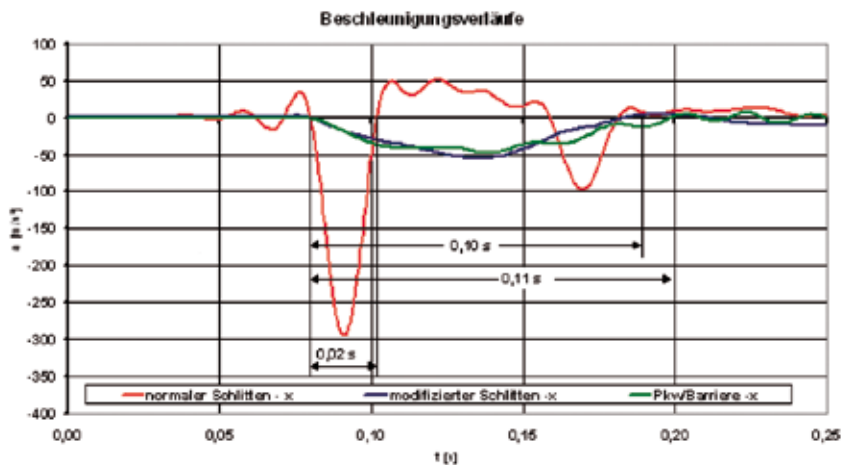


BILD 4: Vergleich der Beschleunigungsverläufe

11,3 km/h für den modifizierten Gurtschlitten. In dem Pkw wurde eine kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung von 12,1 km/h gemessen. Die mittleren Verzögerungen des modifizierten Schlittens und der Pkw-Kollision lagen in einem vergleichbaren Bereich von etwa  $30 \text{ m/s}^2$  (modifizierter Schlitten =  $30,8 \text{ m/s}^2$  und Pkw-Anprall =  $29,5 \text{ m/s}^2$ ). Im extremen Gegensatz dazu war bei dem normalen Gurtschlitten eine mittlere Verzögerung von  $175,5 \text{ m/s}^2$  zu verzeichnen.

Es stellt sich nun die Frage, welchen Einfluss die deutlich geringeren Mittelwerte des modifizierten Schlittens auf die biomechanische Belastung der Probanden haben. Dazu sind in Tabelle 1 die in Längsrichtung gemessenen Kopf- und Brustbeschleunigungen gegenübergestellt. Insgesamt ist festzustellen, dass mit längerer Stoßdauer die Brust- und Kopfbeschleunigungen abnehmen. Allerdings ist diese Abhängigkeit nicht allgemein gültig. So traten bei Proband II nahezu identische Brustbeschleunigungen bei gleicher zeitlicher Ausdehnung auf. Weiterhin fällt auf, dass sich unter den Probanden die Kopfbeschleunigungen deutlich unterscheiden. Es ergibt sich bei Proband IV mit dem modifizierten Gurtschlitten eine mittlere Beschleunigung von  $35,6 \text{ m/s}^2$  bei einer sehr kurzen Dauer von  $0,16 \text{ s}$ . Im Vergleich dazu wurden bei Probandin V  $24,3 \text{ m/s}^2$  in Verbindung mit einer relativ langen Bewegungsdauer von  $0,25 \text{ s}$  gemessen, als sie

sich auf dem normalen Schlitten befand. Nach der oben genannten Feststellung hätte man hier höhere Werte erwartet. Daraus kann man folgern, dass sich anhand der Beschleunigungsverläufe, die direkt an den Probanden gemessen wurden, keine signifikanten Merkmale für die unterschiedlichen Kollisionsdauern der Schlitten feststellen lassen.

Die Auswertung der Videoaufzeichnungen führt zu dem Ergebnis, dass auch hier keine typischen Unterschiede in den Bewegungen der Probanden zu erkennen sind, die sich mit den Varianten der Schlittenanschläge erklären ließen. Man kann aber sehr deutlich Einflüsse durch Antizipation erkennen. Einige Probanden bewegten sich „lockerer“, während andere eine verkrampfte Haltung eingenommen haben. Die Bewegungssequenzen ergeben diesbezüglich unterschiedliche Kopfbewegungen, teils eher translatorisch, teils führt eine Flexionsbewegung der Halswirbelsäule zu einer Kopffrotation.

Exemplarisch zeigen die Bewegungssequenzen in BILD 5 und BILD 6 die beiden oben angesprochenen Versuche mit Proband IV und Probandin V.

Die unterschiedlich langen Kollisionsphasen des Gurtschlittens mit den verschiedenen Anschlägen sind zwangsläufig mit verschiedenen langen Wegstrecken verbunden, die während des Anpralls zurückgelegt werden. Wären die Probanden fest mit dem Schlitten verbunden, dann



BILD 5: Bewegungsablauf Probandin V

BILD 6: Bewegungsablauf Proband IV

würden sie auch die gleichen Verzögerungen wie der Schlitten selbst erfahren. Dann dürfte man aber keine Relativbewegung zwischen Proband und Schlitten erkennen. Hier werden die Kräfte nun aber durch das Rückhaltesystem auf die Probanden übertragen. Verschiedene Elastizitäten führen hier offensichtlich zu einer Angleichung der Relativbewegungen zwischen dem unveränderten und dem modifizierten Gurtschlitten.





BILD 7: Anstoßkonstellation



BILD 8: Proband mit Beschleunigungssensoren

Hier spielt zum Beispiel die Gurtlose eine Rolle, aber auch die körpereigene Flexibilität und Elastizität. Die Bewegungsdynamik der Probanden lässt sich insgesamt bei den beiden Gurtschlittenkonfigurationen miteinander vergleichen. Wie die Ergebnisse der Messungen zeigen, ergibt sich eine deutliche Schnittmenge zwischen den mittleren Beschleunigungen, die mit unverändertem und modifiziertem Schlitten gemessen wurden.

Parallel zu den Gurtschlittenversuchen wurde mit Proband III ein Crashtest durchgeführt. Er prallte angurgurtet in einem Audi 80 mit einer Geschwindigkeit von 9,1 km/h gegen eine ortsfeste Barriere, vor der ein Stoßfängermodell aus Hartholz angebracht war, BILD 7. Der Proband war dabei genau wie bei den Gurtschlittentests mit Beschleunigungsaufnehmern an Kopf und Brust versehen, BILD 8. Die durch den Barrierenanprall entstandenen Schäden können BILD 9 entnommen werden. Die kollisionsbedingte Geschwindigkeitsänderung betrug in diesem Versuch 12,1 km/h.

Die Insassenbewegung bei der Pkw-Kollision ist in BILD 10 den Bewegungssequenzen des gleichen Probanden bei beiden Gurtschlittenversuchen gegenübergestellt. Links ist die Bewegung beim unveränderten Gurtschlitten, in der Mitte mit der verlängerten Kollisionsdauer, und rechts die Pkw-Kollision illustriert. Im direkten Vergleich weist hier die Bewegung im Pkw die geringste Intensität auf, während sich die Gurt-

schlittenversuche praktisch kaum unterscheiden. Auch in den Messwerten zeigt sich dies. Die Belastungen fallen im Pkw am geringsten aus, während die Brustbeschleunigungen bei den Gurtschlittenversuchen mit 33,6 m/s<sup>2</sup> und 30,3 m/s<sup>2</sup> (zu 16,9 m/s<sup>2</sup> im Pkw) etwa gleich sind. Die Kopfbeschleunigung fällt beim Versuch mit dem nicht modifizierten Gurtschlitten mit 29,4 m/s<sup>2</sup> im Vergleich zu den beiden anderen Versuchen (15,7 m/s<sup>2</sup> und 11,8 m/s<sup>2</sup>) deutlich höher aus.

Insgesamt zeigen die auftretenden, an den Probanden gemessenen Verzögerungen in den Versuchen eine geringe Abhängigkeit von der Kollisionsdauer.

Die Ursache für diesen Effekt ist darin zu sehen, dass die Kollision nicht aus einer einzelnen Phase, sondern aus zwei Belastungssituationen besteht. Zunächst erfolgen der Anstoß des Sitzgestells und dessen Verzögerung. Unmittelbar darauf wird der Insasse vom Gurtsystem zurückgehalten. Diese Wirkungen zeigen sich bei den hier untersuchten Gurtschlittentests relativ unabhängig voneinander. Deutlich wird dies an den mittleren Verzögerungen. Mittelt man die Verzögerungswerte aus den durchgeführten Messungen, erhält man für die Verzögerung des Sitzgestells ohne den modifizierten Anschlag einen Wert von 184 m/s<sup>2</sup>.



BILD 9: Schäden des Versuchsfahrzeugs



BIld 10: Vergleich der Bewegungsabläufe Proband III

Mit dem weicheren Anschlag liegt dieser Wert bei  $30 \text{ m/s}^2$ . Für die Brustbeschleunigungen erhält man Werte von  $29 \text{ m/s}^2$  (nicht modifiziert) und  $30 \text{ m/s}^2$  (modifiziert). Der Mittelwert der Kopfbeschleunigung zeigt eine etwas größere Abweichung:  $30 \text{ m/s}^2$  (nicht modifiziert) und  $23 \text{ m/s}^2$  (modifiziert).

Die Belastungen bei den Gurtschlittentests sind tendenziell mit höheren Verzögerungen gegenüber Pkw-Frontalkollisionen verbunden. Damit steht einer Veranschaulichung der biomechanischen Belastungen bei Pkw-Frontalkollisionen mit Gurtschlittentests nichts

im Wege. Weiterhin zeigt diese Untersuchung, dass es nach dem heutigen Wissensstand sinnvoll ist, die bei einer Frontalkollision auf die Fahrzeuginsassen wirkenden biomechanischen Belastungen durch die Angabe der einwirkenden Geschwindigkeitsänderung zu beschreiben.

#### 4 Zusammenfassung

Aufbauend auf der ersten Versuchsreihe mit Gurtschlittentests hinsichtlich der auftretenden Verzögerungen werden hier 11 Versuche mit Probanden vorgestellt, die bei

den Schlittentests mit Beschleunigungsaufnehmern an Kopf und Brust versehen waren. Außerdem wurde der Schlitten modifiziert, um den Crashpuls dem einer Pkw-Kollision anzugleichen. Dadurch konnten die Gurtschlittentests mit einer Pkw-Kollision verglichen werden. Hier wurden neben den Beschleunigungswerten auch die aufgezeichneten Bewegungssequenzen herangezogen. Es stellte sich heraus, dass man bei Gurtschlittentests eher höheren Verzögerungen als beim Pkw-Anprall ausgesetzt ist. Die Bewegungssequenzen zeigen bei allen drei Versuchskonstellationen eine gute Analogie.

#### Literaturhinweise

- [1] Winninghoff, M.; Walter, B.; Becke, M.: Gurtschlitten – Untersuchung der biomechanischen Belastung. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 2000, S. 45 ff
- [2] Walter, B.; K.-H. Schimmelpfennig: Demonstration der Schutzwirkung des Sicherheitsgurtes bei Nutzfahrzeugen. Verkehrsunfall und Fahrzeugtechnik 2003, S. 19 ff
- [3] Becke, M.: Ist delta-v out? Ureko-Spiegel. Eigenverlag Schimmelpfennig + Becke, Münster. 3/2002, S. 4
- [4] Becke, Manfred; Castro, William H.M.; Hein, Martin; Schimmelpfennig, Karl-Heinz: "HWS-Schleudert trauma" 2000 – Standortbestimmung und Vorausblick, Neue Zeitschrift für Verkehrsrecht (2000) 6. S. 225 - 236

#### \* Autoren

Dipl.-Ing. Burkhard Walter ist öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Straßenverkehrsunfälle im Ingenieurbüro Schimmelpfennig + Becke in Münster.

Dipl.-Ing. Markus Winninghoff ist öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger bei Unfallanalyse Berlin und war bis 2006 im Ingenieurbüro Schimmelpfennig + Becke, Münster, tätig.

Dipl.-Ing. Manfred Becke ist öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Kfz.-Technik und Straßenverkehrsunfälle im eigenen Ingenieurbüro Schimmelpfennig + Becke in Münster. ::