

# Schalldruckbelastung von Pkw-Insassen durch Airbags

Von Michael Rohm und Karl-Heinz Schimmelpfennig\*

**Airbags können Fahrzeuginsassen bei Verkehrsunfällen äußerst wirksam vor Anprallverletzungen im Fahrzeuginnenraum schützen. Ob durch die explosionsartige Entfaltung von Airbags schwere Gehörschädigungen möglich sind, untersuchte das Ingenieurbüro Schimmelpfennig und Becke in Münster. In den Versuchen wurde auch das Kollisionsgeräusch mit dem Entfaltungsgeräusch des Airbags verglichen.**

## 1 Grundlagen

### 1.1 Bewertungskriterien

Die Schalldruckbelastungen von Pkw-Insassen wurden bisher unter anderem von Rouhana, S. et al [1] in Amerika und der Suva (Schweizerische Unfallversicherungsanstalt) [2] in Europa untersucht. Abweichend von diesen Versuchen haben die Automobilhersteller jedoch einen eigenen Standard entwickelt (AKZV 01) [3], um die akustische Insassenbelastung zu beurteilen. Da die bisherigen Untersuchungen diesen Standard nicht erfüllten, wurde bei den vorliegenden Versuchen die Firma Müller-BBM (München) hinzugezogen, die Messungen auf Grundlage dieser Anforderungen durchführen kann.

Basis der Beurteilung ist ein mathematisches Modell des Ohres, das die komplexen Eigenschaften der einzelnen Ohrbestandteile nachempfunden [4]. Nach den Entwicklern des sogenannten Human Ear Model beruht die Gehörschädigung auf mechanischer Ermüdung: Wenn bestimmte Bestandteile des Innenohrs zu stark beansprucht werden, führt dies zu einer Schädigung. Auf das Ohr einwirkende Schalldrücke und deren zeitlicher Verlauf sind dabei ausschlaggebende Eingangsgrößen, die durch das Modell verarbeitet werden. Das Ziel dieses Ohrmodells ist es, die Verschiebungen der Basilarmembran im Innenohr durch die einwirkenden Schallimpulse zu berechnen und daraus eine

Gefahrenprognose abzuleiten. Der nach diesem Modell arbeitende Rechenalgorithmus bewertet die für das Gewebe gefährlichen Druckspitzen und Verläufe der Schalldrücke unter Berücksichtigung von Wellenform und -dauer. Das Ergebnis des so errechneten Beschädigungsindex wird in Auditory Damage Units (ADU) angegeben. Je höher der errechnete Gefahrenwert ausfällt, desto größer ist das Risiko einer Hörschädigung. Mit dem Human Ear Model sind Gehörschädigungen wesentlich präziser vorherzusagen als mit herkömmlichen Methoden, weshalb diese Beurteilung von den Automobilherstellern auch gewählt wurde.

Um das Risiko einer Hörschädigung für die Pkw-Insassen zu bewerten, wurde der ADU-Wert bei den durchgeführten Versuchen berechnet. Ein Impulsverlauf mit einem Wert von bis zu 500 ADU liegt dabei noch im sicheren Bereich. Hier tritt eine zeitweilige Hörschwellenverschiebung bis zu 25 dB(A) auf, wobei jedoch noch kein permanenter Hörverlust entsteht.

Als Besonderheit berücksichtigt das Berechnungsmodell den sogenannten »gewarnten Zustand« des Ohres. Hiermit wird die Möglichkeit bezeichnet, dass das Innenohr über einen Selbstschutz verfügt. Für die störfreie Übertragung der Schallwellen sind die Gehörknöchelchen über Sehnen schwebend aufgehängt. Um jedoch aktiv in den Hörverlauf eingreifen zu können, befinden sich an dem Knöchelchen zwei Muskeln.

Einer dieser Muskel zieht über eine Sehne am sogenannten Hammerstiel und sorgt somit für eine Spannung des Trommelfells, wobei der zweite Muskel am Steigbügel befestigt ist [10]. Durch das Zusammenwirken beider Muskeln können die Gehörknöchelchen gegeneinander gezogen werden, wodurch ihr wechselseitiges Spiel verringert wird. Bei hohen Schallpegeln wird die wichtigere Funktion dieser Muskeln deutlich: Überschreitet der Schallpegel einen gewissen Wert, so werden beide Muskeln stärker angespannt, wodurch das Trommelfell straffer gespannt wird. Infolge dieser Anspannung werden die Schallwellen vom Trommelfell stärker reflektiert, womit die ins Ohr eingeleitete Leistung sinkt und die Auslenkung des Steigbügels beschränkt wird. Diese immanente Schallpegelbegrenzung schützt die im Innenohr liegenden Sinneszellen vor einer Schädigung durch zu hohe Schalldruckamplituden.

Beide Muskeln haben allerdings eine gewisse Ansprechzeit, bis sie zum vollen Schutz angespannt sind. Diese Zeit ist vom Schallpegel abhängig und beträgt zirka 35 ms bei hohen Schallpegeln von etwa 130 dB und bis zu 150 ms bei niedrigen Schallpegeln [8, 9], **BILD 1**.

Die Mittelohrmuskeln bieten aus diesem Grund nur einen unzureichenden Schutz des Innenohrs vor plötzlich auftretenden, sehr lauten Schallereignissen (vulgo: Knall). Der Schalldruckpegel kann in solchem Fall einen für das Innenohr gefährlichen Höchstwert erreichen, bevor die Mittelohrmuskeln zum Schutz in den angespannten Zustand versetzt werden.

### 1.2 Medizinische Grundlagen

Aus medizinischer Sicht unterscheidet man zwischen:

- Knalltrauma
- Explosionstrauma
- akutem Lärmtrauma.

Für die Beurteilung der Einwirkung auf den Menschen sind der Schalldruck – über der Frequenz – sowie die Dauer der Einwirkung maßgeblich. Zur Beurteilung der akustischen Insassenbelastung durch Airbags ist das Knalltrauma maßgeblich. Es entsteht durch eine einmalige oder wiederholte Einwirkung einer Schalldruckwelle, deren Druckspitze bei 160 bis 190 dB(A) liegt. Bei einer Zeitspanne der Druckwelle von 1 bis 3 ms bleibt das Trommelfell intakt und es tritt lediglich eine Schädigung des Innenohres ein. Der impulsartige Anstieg der Druckwelle verursacht im Innenohr so hohe Druckschwankungen, dass diese zu starken Verschiebungen der Basilarmembran führen und dadurch die Haarzellen geschädigt werden.

Die so geschädigte Person empfindet sofort eine Vertaubung der Ohren, verbunden mit Ohrensausen und oft stechendem Schmerz. Die anfangs erhebliche Schwerhörigkeit klingt schon nach kurzer Zeit ab, die Regeneration ist in der Regel nach einigen Tagen bis Wochen abgeschlossen und der Normalzustand erreicht. Die ausschließliche Schädigung des Innenohrs ist das Kennzeichen des Knalltraumas. Bei dem der Schallquelle zugewandten Ohr ist die Schädigung ausgeprägter als auf der anderen Seite, da das abgewandte Ohr durch die Schattenwirkung des Kopfes etwas geschützt ist. Die häufigsten Ursachen für Knalltraumen sind Schießübungen mit Handfeuerwaffen und Geschützen [5].

Häufig wird im Zusammenhang mit Airbagexplosionen ein Tinnitus diagnostiziert. Tinnitus ist der medizinische Fachausdruck für Ohrengeräusche oder Ohrensausen. Von den betroffenen Personen wird jedes Geräusch als Pfeifen, Rauschen, Zischen oder Summer erlebt. Tinnitus ist jedoch lediglich ein Symptom und keine detaillierte Diagnose. Ein Tinnitus wirkt sich nicht immer gleich aus, sodass er nach unterschiedlichen Kriterien klassifiziert wird [6]:

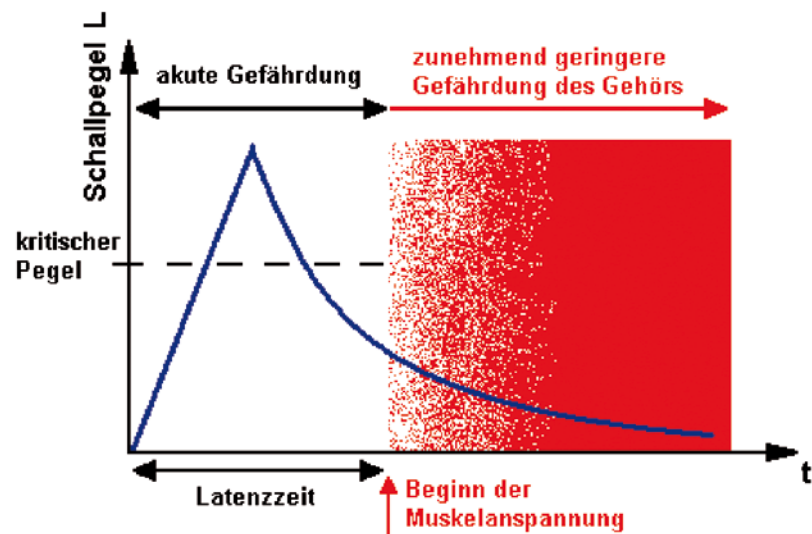


BILD 1: Kontraktion der Mittelohrmuskeln

TABELLE 1: Versuchsfahrzeuge

	Fahrzeuge	
Hersteller	Ford	Ford
Modell	Fiesta	Mondeo Turnier
Baujahr	1996	1994
Typ-Bezeichnung	GFJ	BNP
Leergewicht	845 kg	1295 kg
Hubraum	1119 cm <sup>3</sup>	1597 cm <sup>3</sup>
Anzahl der Türen	3	5
Innenraumvolumen	ca. 2,3 m <sup>3</sup>	ca. 3,4 m <sup>3</sup>
Interne Fzg.-Nr.	2067	2159
laufende Versuchs-Nr.	FF	FM

1. Entstehungsmechanismus: objektiv-subjektiv

- Beim objektivem Tinnitus existiert eine körpereigene Schallquelle in der Nähe des Ohres, deren Schallaussendungen gehört werden. Hierzu gehören gefäß- oder muskelbedingte Geräusche. Der objektive Tinnitus kann auch von Außenstehenden gehört werden.
- Beim subjektiven Tinnitus liegt eine fehlerhafte Informationsbildung im Hörsystem ohne Einwirkung eines akustischen Reizes vor. Diese Form des Tinnitus wird nur von Betroffenen selbst wahrgenommen und ist nur schwer nachzuweisen. Durch standardisierte audiometrische Tinnitusuntersuchungen lässt sich dieser jedoch – in Grenzen – objektivieren [7].

2. Zeitverlauf: akut, subakut oder chronisch

- Beim akuten Tinnitus klingen die Symptome in weniger als drei Monaten wieder ab.
- Vom subakuten Tinnitus spricht man bei einer Zeitdauer zwischen drei Monaten und einem Jahr.
- Ein Tinnitus wird chronisch, wenn er länger als ein Jahr besteht.

3. Sekundäre Symptomatik: kompensiert – dekompensiert

- Ein Tinnitus kann kompensiert werden, indem der Patient das Ohrgeräusch registriert, mit diesem jedoch umgehen kann, ohne dass zusätzliche Symptome auftreten. Es besteht kein oder nur ein geringer Leidensdruck. Die Lebensqualität ist nicht wesentlich beeinträchtigt.

- Im dekompensierten Fall kann das Ohrgeräusch massive Auswirkungen auf sämtliche Lebensbereiche haben, sodass es zur Entwicklung einer Sekundärsymptomatik – Angstzustände, Schlafstörungen, Konzentrationsstörungen oder sogar Depressionen – kommen kann. Es besteht hoher Leidensdruck, der die Lebensqualität wesentlich beeinträchtigt.

Als Ursache für einen Tinnitus können viele Ereignisse in Betracht kommen. Ein Tinnitus kann isoliert infolge von Lärm, Stress, Belastungen (etwa durch Ängste) beziehungsweise nach einem Hörsturz auftreten oder in Verbindung mit einer Krankheit (Mittelohrentzündung). Auch Probleme mit der Halswirbelsäule oder im Zahn-/Kieferbereich können auslösende oder verstärkende Ursachen sein, wobei es noch weitere zahlreich erforschte und theoretische Ansätze zur Tinnitustestung gibt.

Die Schädigung des Hörsystems äußert sich ausschließlich in zwei Symptomen: Das Hören wird schlechter und/oder es tritt ein Tinnitus auf. Jeder Defekt im Hörsystem kann auch zum Tinnitus führen, jedoch lässt sich die Hörschädigung leichter diagnostizieren, da es sich beim Tinnitus in den meisten Fällen um einen subjektiven Tinnitus handelt.

Wenn der Tinnitus infolge eines Unfalls auftritt, lässt er sich in der Regel über ein Tonaudiogramm objektivieren. Hierbei tritt in einigen Fällen eine messbare Hörstörung in Form eines Hochtonabfalls auf [5].

## 2 Versuche

Für die Versuchsreihen zur Schalldruckerfassung von Frontairbags wurden zwei verschiedene Fahrzeuge verwendet, in denen jeweils einstufige Generatoren mit Natriumzellose als Treibstoff verbaut waren.

Es wurde ein klein- und ein großvolumiges Fahrzeug gewählt, um das Innenraumvolumen als Parameter zu berücksichtigen. Der Kleinwagen (Ford Fiesta) verfügte werkseitig nur über einen Fahrerairbag und das großvolumige Fahrzeug, ein Ford Mondeo Turnier, zusätzlich über einen Beifahrerairbag, TABELLE 1.

Die Messtechnik wurde vollständig von der Firma Müller-BBM zur Verfügung gestellt und von ihr auch bedient. Um den Schalldruck zu messen, wurde ein Kunstkopf mit speziellen Mikrofonen verwendet, BILD 2.

Um den Schalldruck realitätsnah zu erfassen, wurde der Kunstkopf bei den Versuchsreihen in den Fahrzeugen auf einem Hybrid-Dummy II positioniert. Über die Versuchsmatrix sollte untersucht werden, inwiefern Fahrzeugvolumen, Sitzbelegung, Messort sowie Anzahl der gezündeten Airbags einen Einfluss auf das Messergebnis haben, TABELLE 2.

In einem weiteren Versuch wurde der Schalldruck in der Fahrgastzelle während einer Kollision erfasst (ohne dass ein Airbag gezündet wurde). Mit dem rein kollisionsbedingten Schalldruck als Referenzwert sollte ermittelt werden, ob der Airbagknall im Crashgeräusch untergeht oder den Schalldruckpegel tatsächlich signifikant erhöht.

## 3 Ergebnisse

Der gesamte Verlauf einer Airbagexplosion mit anschließender Luftsackentfaltung erstreckt sich über einen Zeitraum von zirka 250 ms. In unseren Versuchen wurden maximale Schallpegel von 155,6 bis 170,4 dB(A) gemessen, die jeweils bereits innerhalb der ersten 10 ms nach Zündung erreicht wurden und sich nur über einen Bruchteil von 1 ms halten konnten, BILD 3. Der steile Druckanstieg und der ebenso abrupte Abfall bewirken gerade das Erreichen des Spitzendrucks. Der Luftsack ist nach zirka 20 ms voll entfaltet. Das Volumen des sich aufblasenden Luftsacks bewirkt einen leichten Anstieg des Luftdrucks in der Fahrgastzelle, sodass sich der Verlauf der Schallwelle im Zeitraum 20 bis 45 ms auf leichtem Überdruckniveau von zirka 400 Pa einschwingt. Dieser Innendruck steigt bei einer zusätzlichen Luftsackentfaltung um weitere 300 bis 400 Pa.

Der gemessene Spitzendruck hängt von der Entfernung der Schallquelle zum Mikrofon, von schallreflektierenden Gegebenheiten in unmittelbarer Nähe sowie vom Volumen des Innenraums ab. Im Kleinwagen konnten etwas höhere Drücke gemessen werden als im Mittelklasse-Pkw. Ein geöffnetes Fenster lässt den Schalldruck entweichen, wodurch sich geringere statische Drücke ergeben. Da beim geöffneten Fenster kein Überdruck durch das entstehende Luftsackvolumen entsteht, schwingen die Druckverläufe in diesem Fall um die Nulllinie.

Um die mögliche Hörschädigung zu berechnen, wurden die Signale ausgewertet und der ADU-Wert berechnet.

Wenn die Schallimpulse auf ein ungewartetes Ohr treffen, stellt sich für jede der Messungen eine mögliche Verschiebung der Hörschwelle ein, BILD 4. Eine Hörschwellenverschiebung von über 25 dB kann bei allen Airbagauslösungen – bis auf einen Fall – auf dem linken Ohr festgestellt werden, was zum Hörverlust führen kann.

Wenn das Mittelohr durch eine simulierte Anspannung der Mus-



BILD 2: Kunstkopf mit zwei Mikrofonen (links), Dummy mit Kunstkopf (rechts)

TABELLE 2: Matrix der Airbagmessungen

Fahrzeug	Versuchs-Nr.	Messort	Auslösender Airbag	Sitzbelegung	Randparameter	Anzahl der Messungen
Ford Fiesta	FF-01 / FF-02	Fahrersitz	Fahrerairbag	nur Fahrersitz	Fenster geschlossen, normale Sitzposition	2
	FF-03	Fahrersitz	Fahrerairbag	Fahrer- und Beifahrersitz	Fenster geschlossen, normale Sitzposition	1
	FF-04	Beifahrersitz	Fahrerairbag	Fahrer- und Beifahrersitz	Fenster geschlossen, normale Sitzposition	1
	FF-05	Fahrersitz	Fahrerairbag	nur Fahrersitz	Fenster geöffnet, normale Sitzposition	1
	FF-06	Fahrersitz	Fahrerairbag	nur Fahrersitz	Fenster geschlossen, Kopf zum Seitenfenster gedreht	1
Ford Mondeo	FM-01	Fahrersitz	Fahrerairbag	nur Fahrersitz	Fenster geschlossen, normale Sitzposition	1
	FM-02	Fahrersitz	Fahrer- und Beifahrerairbag	nur Fahrersitz	Fenster geschlossen, normale Sitzposition	1
	FM-03	Fahrersitz	Fahrer- und Beifahrerairbag	Fahrer- und Beifahrersitz	Fenster geschlossen, normale Sitzposition	1
	FM-04	Beifahrersitz	Fahrer- und Beifahrerairbag	Fahrer- und Beifahrersitz	Fenster geschlossen, normale Sitzposition	1

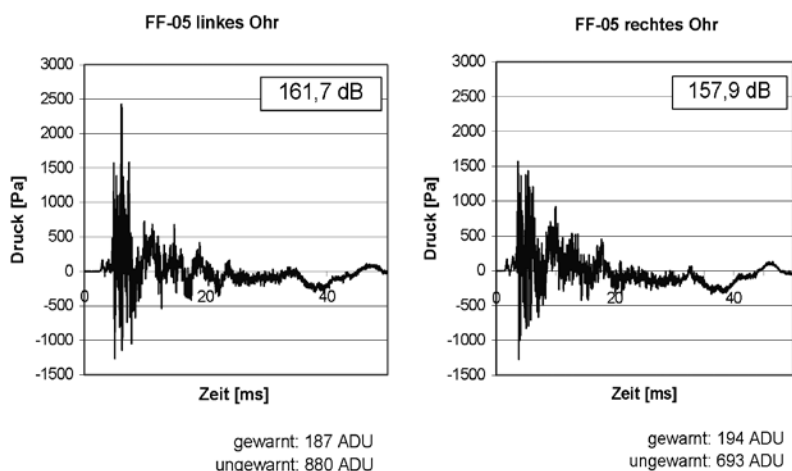


BILD 3: Messung der Schalldruckpegel nach Airbagzündung

keln in den gewarnten Zustand versetzt wird, so überschreitet keiner der errechneten Gefahrenwerte den Wert von 500 ADU. Problematisch ist jedoch, dass die Latenzzeit für den Selbstschutzmechanismus des Ohrs größer ist als die Zeitspanne zwischen Schallbeginn und Spitzenpegel. Um den Selbstschutzmechanismus in der Praxis nutzen zu können, ist es deshalb notwendig, Pre-Crash-Sensoren zu benutzen: Über ein externes Signal, zum Beispiel der Audioanlage, könnte das Ohr in den gewarnten Zustand versetzt werden.

Der durch die Pkw-Pkw-Frontalkollision in der Fahrgastzelle verursachte Schalldruck ergibt einen ADU-Wert von lediglich 4 beziehungsweise 8 bei einem Spitzenpegel von 146,7 dB(A). Durch diese geringen Werte entstehen für eine betroffene Person kein Risiko einer Hörschädigung und somit keine Verschiebung der Hörschwelle. Im Vergleich zum explodierenden Airbag verläuft das Innengeräusch der Frontalkollision über eine längere Zeitspanne und zeitversetzt; das Kollisionsgeräusch erreicht das Ohr zirka 40 ms später

als der maximale Schalldruckpegel der Airbagexplosion, BILD 5.

Die aufgeführten möglichen Verschiebungen der Hörschwelle entstehen nach dem Human Ear Model durch Schädigungen der Haarzellen im Innenohr. Der Definition nach ist die alleinige Schädigung des Innenohrs das Merkmal eines Knalltraumas. Ob gemessene Schallverläufe auch zu Trommelfellrisen und anderen Mittelohrschädigungen führen können oder einen Tinnitus verursachen, wird aus der Bewertung durch das Programm nicht ersichtlich. Da sich das Auswerteprogramm auf eine direkt nach der Einwirkung einstellende Hörschwellenverschiebung bezieht, kann aus technischer Sicht keine Aussage über die Zeitspanne des möglichen Hörverlustes gemacht werden. Eine zusätzliche Beurteilung aus medizinischer Sicht ist somit sinnvoll.

#### 4 Zusammenfassung

Im Rahmen einer versuchstechnischen Untersuchung wurde analysiert, inwiefern Hörschäden durch die Entfaltung von Airbags möglich sind. Bei der Beurteilung der aku-

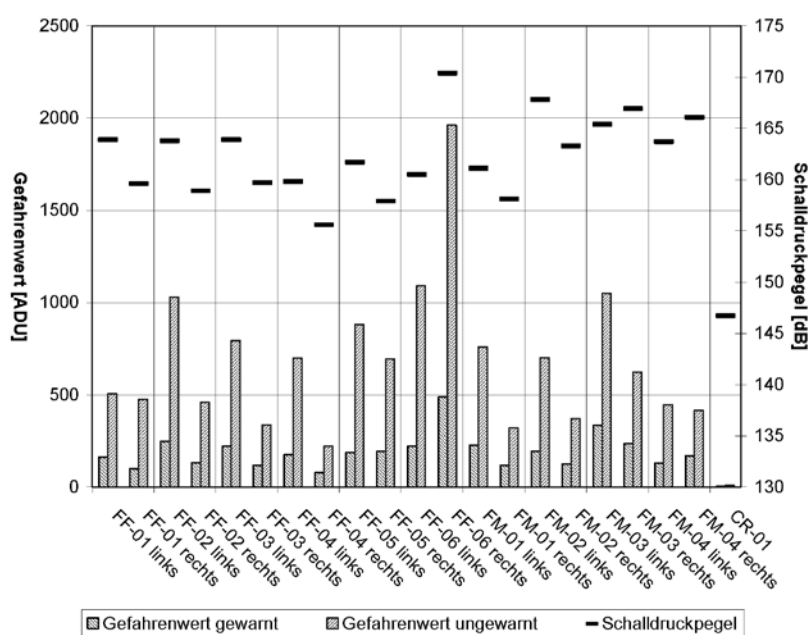


BILD 4: Darstellung der Messergebnisse – Schalldruckpegel und Gefahrenwerte

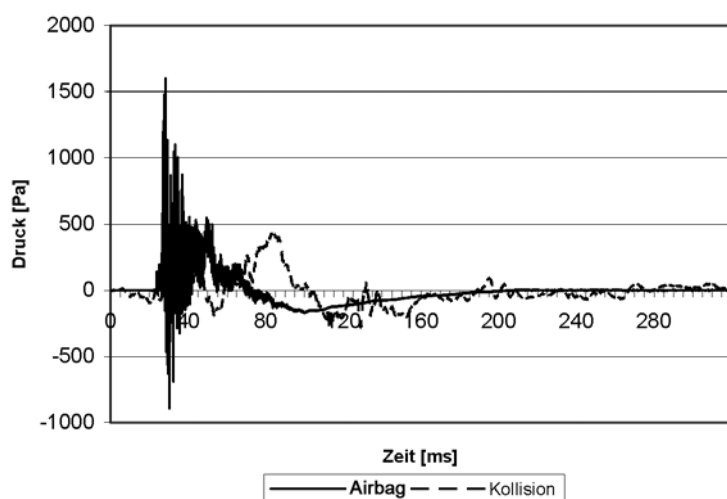


BILD 5: Überlagerung von Kollisionsgeräusch und Airbagexplosion

stischen Belastung wurde beachtet, dass das Mittelohr über einen Schutzmechanismus verfügt; durch eine Muskelverspannung kann sich das Ohr in einen so genannten „gewarten Zustand“ versetzen.

Die Versuche ergaben, dass die Schallimpulse insbesondere für das ungewarte linke Ohr des Fahrers eine mögliche Hörschädigung zur Folge haben. Wenn das Mittelohr durch eine simulierte Anspannung der Muskeln in den gewarten Zustand versetzt wird, wird der kritische Belastungswert nicht erreicht.

Des Weiteren wurde der kollisionsbedingte Schalldruck im Vergleich zum Entfaltungsgeschall der Airbags untersucht. Die Analyse führte zu dem Ergebnis, dass der kollisionsbedingte Schalldruck den Fahrer deutlich später und weniger intensiv erreicht als das Entfaltungsgeschall der Airbags.

**Literaturhinweise**

[1] Rouhana, S. W; Dunn, V. C.; Webb, S. R.: Investigation Into the Noise Associated With Air Bag Deploy-

ment: Part II – Injury Risk Study Using a Mathematical Model of the Human Ear. SAE P-337 (1998), 42nd Stapp Car Crash Conference Proceedings, S. 267-285

[2] Hohmann, B.: Gehörschäden durch Airbag. Schweizerische Unfallversicherungsanstalt Suva, Bereich Akustik, Fortschritte der Akustik – Tagungsbericht zur DAGA 98 in Zürich; DEGA, Oldenburg

[3] Arbeitskreis Zielvereinbarung, Pyrotechnische Rückhaltesysteme im Fahrwerk, AK-ZV 01, Arbeitskreis der Firmen: Audi AG, BMW AG, Daimler Chrysler AG, Porsche AG und Volkswagen AG, März 2001

[4] Price, G. R.; Kalb, J. T.: Using the Auditory Hazard Assessment Algorithm (AHAAH), <http://www.arl.army.mil/ARL-Directorates/HRED/AHAAH/>, 02. 01. 2004

[5] Feldmann, H.: Das Gutachten des Hals-Nasen-Ohren-Arzt. 5. überarbeitete und erweiterte Auflage, Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag, 2001

[6] Ganzer, U.; Arnold, W.: Leitlinie Tinnitus. URL: [http://www.uni-duesseldorf.de/WWW/AWMF/II/hno\\_II63.htm](http://www.uni-duesseldorf.de/WWW/AWMF/II/hno_II63.htm), 14. 10. 2004

[7] Hugemann, C.: Der Tinnitus als Unfallfolge: Physischer oder psychischer Schaden? Neue Zeitschrift für Verkehrsrecht, Sonderdruck aus NZV 9/2003

[8] Eska, G.: Schall & Klang, wie und was wir hören. Basel, Bosten, Berlin: Birkhäuser Verlag, 1997

[9] Bergische Universität Wuppertal: Physiologie des Ohres. [http://www.dasp.uni-wuppertal.de/ars\\_auditus/physiologie/mittelohr.htm](http://www.dasp.uni-wuppertal.de/ars_auditus/physiologie/mittelohr.htm), 17. 12. 2004

[10] Boenninghaus, Hans-Georg; Lenarz, Thomas: Hals-Nasen-Ohren-Heilkunde. Heidelberg: Springer-Verlag, Dezember 2004

**\* Autoren**

Dipl.-Ing. Michael Rohm ist öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Straßenverkehrsunfälle im Ingenieurbüro Schimmelpfennig und Becke in Münster

Prof. Karl-Heinz Schimmelpfennig ist öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Kfz-Technik und Straßenverkehrsunfälle sowie Unfälle mit mechanisch-technischem Gerät im eigenen Ingenieurbüro in Münster. ::