

## Unfallrekonstruktion

### Schalldruckbelastung von Pkw-Insassen durch Airbags

von Dipl.-Ing. Michael Rohm, Münster\*

*Die Ausrüstungsrate von Front-Airbags liegt mittlerweile bei fast 100 %. Von den Herstellern wird ausschließlich das Schutzpotenzial dieser Rückhalteeinrichtung beworben. Ein nach dem Stand der Technik nicht zu verhinderndes Gefahrenpotenzial wird – zumindest in Deutschland – nicht publiziert.*

\* Der Autor ist Sachverständiger im Ingenieurbüro Schimmelpfennig + Becke, Münster.

Verletzungen sind jedoch aufgrund des energiereichen Systems nicht grds. auszuschließen. In diesem Fall kommt es dann i.d.R. zu einem Rechtsstreit, da den Insassen dieses Risiko nicht bewusst war. Im Jahr 2000 hat das OLG Hamm möglicherweise richtungsweisend einem Kläger Schmerzensgeld zugesprochen, weil er infolge der ausgelösten Airbags einen Tinnitus erlitten haben soll. In der Literatur gibt es jedoch wenig Angaben dazu, wie belastend die Schalldruckbelastung infolge einer Airbag-Auslösung ist, sodass von unabhängiger Seite Klärungsbedarf besteht. Allein den Angaben der Hersteller zu folgen, erscheint nicht sinnvoll. Deshalb wurde die vorliegende Arbeit durchgeführt.

Die Ausarbeitung soll das Ausmaß möglicher Hörschäden aufzeigen, die sich durch die Explosion eines Airbags einstellen können. Im Rahmen von Versuchen wurde dabei der innerhalb eines Fahrzeugs wirkende Schalldruck gezündeter Front-Airbag-Module messtechnisch erfasst und durch ein spezielles Bearbeitungsprogramm bewertet.

## I. Grundlagen

### 1. Bewertungskriterien

Die Schalldruckbelastungen von Pkw-Insassen wurden bisher u.a. von ROUHANA/DUNN/WEBB (Investigation into the noise associated with air bag deployment: Part II – Injury risk study using a mathematical model of the human ear, in: 42nd Stapp Car Crash Conference Proceedings, 1998, S. 267 – 285) in Amerika und der Suva (Schweizerische Unfallversicherungsanstalt) (HOHMANN, *Gehörschäden durch Airbag*, in: Tagungsbericht zur DAGA 98, 1998) in Europa untersucht. Abweichend von diesen Versuchen haben die Automobilhersteller jedoch einen eigenen Standard entwickelt (Arbeitskreis Zielvereinbarung, Pyrotechnische Rückhaltesysteme im Fahrwerk, AK-ZV 01, März 2001), 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 mathematisch aufgebautes Modell des Ohres, das die komplexen Eigenschaften der einzelnen Ohr-Bestandteile nachempfunden (PRICE/KALB, Using the Auditory Hazard Assessment Algorithm (AHAHAH), <http://www.arl.army.mil/ARL-Directorates/HRED/AHAHAH/>, 2.11.2004). Nach den Entwicklern des sog. Human Ear Model ist der Vorgang einer Gehörschädigung mit dem Fall einer mechanischen Ermüdung gleichzusetzen. Wenn bestimmte Bestandteile des Innenohrs zu stark beansprucht werden, führt dies zu einer Schädigung. Auf das Ohr einwirkende Wellenverläufe und Spitzendrücke eines Schallereignisses sind dabei ausschlaggebende Eingangsgrößen, die durch das Modell verarbeitet werden. Das Ziel dieses menschlichen Ohr-Modells ist es, Verschiebungen der Basilarmembran im Innenohr durch einwirkende Impulse zu berechnen und aus diesem eine Gefahrenvorhersage abzuleiten. Ein nach diesem Modell arbeitender Rechenalgorithmus bewertet die für das Gewebe gefährlichen Druckspitzen und Verläufe des Schalldrucks unter Berücksichtigung der Wellenform und -dauer. Das Ergebnis dieses errechneten Beschädigungsindex wird in „Auditory Damage Unit“ (ADU) angegeben. Je höher der errechnete Gefahrenwert ausfällt, desto höher ist das Risiko einer Hörschädigung. Mit diesem Grundmodell sind Gehörschädigungen wesentlich korrekter und weitaus genauer 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 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 einen sog. „gewarnten Zustand“ des Ohrs. Hiermit wird die Möglichkeit bezeichnet, dass das Innenohr über einen Selbstschutz verfügt. Für eine störfreie Übertragung der Schallwellen aus der Luft sind die Gehörknöchelchen über Sehnen schwebend aufgehängt. Um jedoch aktiv in den Hörverlauf eingreifen zu können, befinden sich an den Knöchelchen zwei Muskeln. Einer dieser Muskeln zieht über eine Sehne am sog. Hammerstiel und sorgt somit für eine Spannung des Trommelfells, wobei der zweite Muskel am Steigbügel befestigt ist. Durch

Untersuchungen und  
Versuche

Modell des Ohres

„Gewarnter Zustand“ des  
Ohres

das Zusammenwirken der beiden Muskeln können die Gehörknöchelchen gegeneinander gezogen werden, wodurch das Spiel der Knöchelchen zueinander verringert wird. Bei hohen Schallpegeln wird die wichtigere Funktion der Muskeln deutlich: Überschreitet der übertragene Schall einen gewissen Wert, kommt es zu einer stärkeren Anspannung der beiden Muskeln, wodurch das Trommelfell stärker gespannt wird. Als Folge dieser Anspannung wird die Reflexion der Schallwellen am Trommelfell erhöht und die Steigbügelauslenkung eingeschränkt. Durch die verminderte Steigbügelauslenkung sind die im Innenohr liegenden Sinneszellen vor einer Beschädigung durch zu hohe Schalldruckamplituden geschützt. Beide Muskeln benötigen allerdings eine gewisse Ansprechzeit, bis sie zum vollen Schutz angespannt sind. Diese Zeit ist vom Schall abhängig und beträgt ca. 35 ms bei hohen Schallpegeln von etwa 130 dB und bis zu 150 ms bei niedrigen Schallpegeln.

Die Mittelohrmuskeln erfüllen aus diesem Grund nur einen unzureichenden Schutz des Innenohrs vor plötzlich auftretenden lauten Schallereignissen wie z.B. einem Knall. Der Schalldruckpegel eines Schallereignisses kann einen für das Innenohr gefährlichen Höchstwert erreichen, bevor die Mittelohrmuskeln zum Schutz in den angespannten Zustand versetzt werden.

## 2. Medizinische Grundlagen

Aus medizinischer Sicht unterscheidet man zwischen einem Knall-, einem Explosions- und einem akuten Lärmtrauma. Für die Beurteilung akustischer Einwirkung auf die 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 zwischen 160 und 190 dB(A) liegt. Bei einer Zeitspanne der Druckwelle von 1 – 3 ms bleibt das Trommelfell intakt und es tritt lediglich eine Schädigung des Innenohrs ein. Der impulsartige Anstieg der Druckwelle verursacht im Innenohr so hohe Druckschwankungen, dass diese zu starken Verschiebungen der Basilarmembran führen und es hierdurch zu Beschädigungen von Haarzellen kommt. Die geschädigte Person empfindet sofort eine Vertäubung der Ohren, verbunden mit Ohrensausen und oft einem stechenden Schmerz. Eine anfänglich erhebliche Schwerhörigkeit zeigt schon nach kurzer Zeit eine Besserung, welche i.d.R. nach einigen Tagen bis Wochen abgeschlossen ist und sich der Normalzustand einstellt. Die ausschließliche Schädigung des Innenohrs ist das Kennzeichen des Knalltraumas. Bei einem der Schallquelle zugewandten Ohr ist die Schädigung ausgeprägter als auf der anderen Seite, da das abgewandte Ohr durch die Schatteneinwirkung des Kopfes etwas geschützt ist. Die häufigsten Ursachen für Knalltraumen sind Schießübungen mit Handfeuerwaffen und Geschützen (FELDMANN, Das Gutachten des Hals-Nasen-Ohren-Arztes, 5. Aufl. 2001).

Häufig wird im Zusammenhang mit Airbag-Explosionen ein Tinnitus diagnostiziert. Tinnitus ist der medizinische Fachausdruck für Ohrengeräusche oder Ohrensausen. Von betroffenen Personen wird jedes Geräusch als Pfeifen, Rauschen, Zischen oder Summen 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 (GANZER/ARNOLD, Leitlinie Tinnitus, [http://www.uni-duesseldorf.de/WWW/AWMF/III/hno\\_1163.htm](http://www.uni-duesseldorf.de/WWW/AWMF/III/hno_1163.htm), 14.10.2004):

### Übersicht: Klassifizierungskriterien Tinnitus

#### Entstehungsmechanismus: objektiv-subjektiv

Bei einem objektiven Tinnitus existiert eine körpereigene physikalische 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 Tinnitus-Untersuchungen lässt sich dieser jedoch – in Grenzen – objektivieren (HUGEMANN NZV 2003, 406.)

Unzureichender Schutz des Innenohres

Beurteilung akustischer Einwirkungen auf den Menschen

Tinnitus

### Zeitverlauf

Ein Tinnitus kann akut, subakut oder chronisch verlaufen. Beim akuten Zeitverlauf klingen die Symptome in weniger als 3 Monaten wieder ab. Von einem subakuten Zeitverlauf spricht man bei einer Zeitdauer zwischen 3 Monaten und 1 Jahr. Ein Tinnitus wird chronisch, wenn er länger als 1 Jahr besteht.

### Sekundäre Symptomatik: kompensiert – dekompenziert

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

### Ursache des Tinnitus

Als Ursache für einen Tinnitus können viele Ereignisse in Betracht kommen. Ein Tinnitus kann isoliert infolge von Lärm, Stress, Belastungen wie Ängste bzw. 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, zahlreiche erforschte und theoretische Ansätze zur Tinnitus-Entstehung gibt.

Eine Schädigung des Hörsystems äußert sich ausschließlich durch zwei Symptome: Das Hören wird schlechter und/oder es tritt ein Tinnitus auf. Jeder Defekt im Hörsystem kann auch zu einem Tinnitus führen. Jedoch lässt sich eine Hörschädigung leichter diagnostizieren, da es sich beim Tinnitus in den meisten Fällen um einen subjektiven Tinnitus handelt.

Wenn ein Tinnitus infolge eines Unfalls auftritt, lässt er sich i.d.R. durch Erstellen eines Tonaudiogramms objektivieren. Hierbei tritt in einigen Fällen eine messbare Hörstörung auf, die sich durch einen Hochtonabfall lokalisieren lässt (FELDMANN, a.a.O.).

## II. Versuche

Für die Versuchsreihen zur Schalldruckerfassung von Front-Airbags wurden zwei Versuchs-Fahrzeuge verwendet; in beiden Fahrzeugen waren einstufige Generatoren mit Natriumzellulose als Treibstoff verbaut.

Es wurde ein klein- und großvolumiges Fahrzeug gewählt, um das Innenraumvolumen als Parameter zu berücksichtigen. Der Kleinwagen (Ford Fiesta) verfügte werkseitig über einen Fahrer-Airbag, und das großvolumige Fahrzeug, ein Ford Mondeo Turnier, über einen Fahrer- und Beifahrer-Airbag (Tab. 1).

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

Tab. 1: Fahrzeuge für Airbagmessungen

Die verwendete Messtechnik wurde vollständig von der Firma Müller-BBM zur Verfügung gestellt und während der Messung bedient. Um den Schalldruck zu messen, wurde ein Kunstkopf mit speziellen Mikrofonen verwendet (Abb. 1).



**Abb. 1:** Kunstkopf mit zwei Mikrofonen

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 (Tab. 2).

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
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

**Tab. 2:** Matrix der Airbagmessungen

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

### III. Ergebnisse

Der gesamte Verlauf einer Airbag-Explosion mit anschließender Luftsack-Entfaltung benötigt einen Zeitraum von ca. 250 ms. Bei den durchgeführten Versuchen wurden maximale Schallpegel zwischen 155,6 dB – 170,4 dB gemessen, die bei jeder Messung schon innerhalb der ersten 10 ms nach dem Zündzeitpunkt erreicht wurden und sich nur über einen Bruchteil von 1 ms halten konnten (Abb. 2). Die kurze Zeit des Druckanstiegs und der ebenso abrupte Abfall bewirken gerade das Erreichen des Spitzendrucks, der im weiteren Verlauf starke Schwankungen bis weit in den Unterdruckbereich mit sich zieht. Durch diesen intensiven Verlauf des Schalldrucks innerhalb der ersten 30 ms ist der Luftsack nach weiteren 20 ms voll entfaltet. Das entstehende Luftsack-Volumen bewirkt einen leichten Anstieg des Innenraumdrucks, sodass sich der Verlauf der Schallwelle zwischen 20 und 45 ms auf leichtem Überdruckniveau von ca. 400 Pascal einschwingt. Dieser Innen- druck steigt bei einer zusätzlichen Luftsackentfaltung um weitere 300 – 400 Pascal.

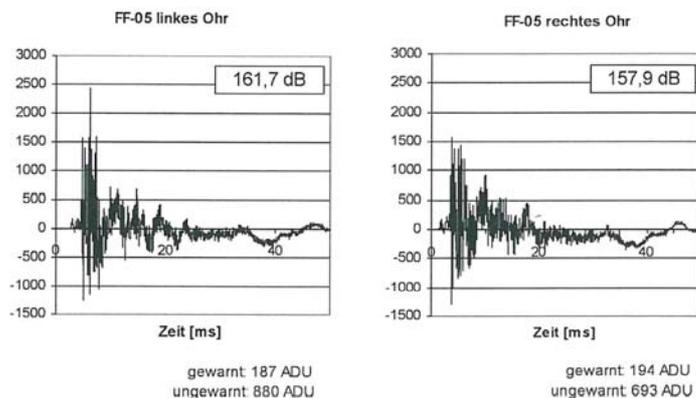


Abb. 2: Vergleich FF-01 zu FF-02

#### Spitzendruck

Der erfasste Spitzendruck der einzelnen Versuche hängt dabei von der Entfernung der Schallquelle zum Mikrophon, von Schall reflektierenden Gegebenheiten in unmittelbarer Nähe sowie vom Volumen des Innenraums ab. Im Fahrzeug mit dem kleineren Innenraumvolumen konnten etwas höhere Drücke gemessen werden als im Fahrzeug mit dem größeren Volumen. Ein geöffnetes Fenster hingegen lässt den Schalldruck entweichen, wodurch sich geringere 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 ungewandtes Ohr treffen, stellt sich für jede der durchgeführten Messung eine mögliche Verschiebung der Hörschwelle ein (Abb. 3). Eine Hörschwellenverschiebung von über 25 dB kann bei allen Airbag-Auslösungen – bis auf einen Fall – auf dem linken Ohr festgestellt werden, was zu einem permanenten Hörverlust führen kann.

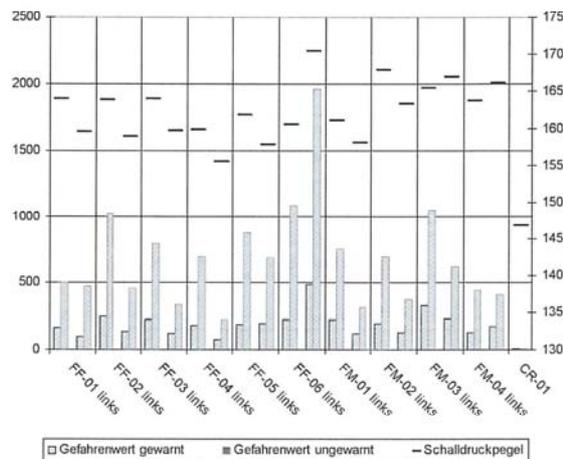
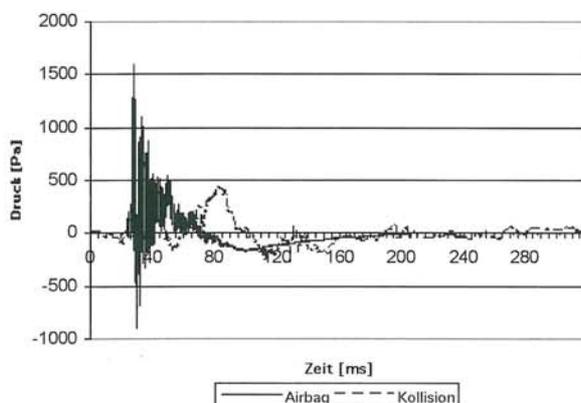


Abb. 3: Darstellung der Messergebnisse

Wenn das Mittelohr durch eine simulierte Anspannung der Muskeln in den gewarnten Zustand versetzt wird, so überschreitet keiner der errechneten Gefahrenwerte einen Wert von 500 ADU. Problematisch ist jedoch, dass die Latenzzeit für den Selbstschutzmechanismus des Ohrs größer ist als die Zeitdauer zwischen Schallbeginn und Spitzen-schallpegel. Um den Selbstschutzmechanismus letzten Endes in der Praxis nutzen zu können, ist es deshalb notwendig, Pre-Crash-Sensoren zu benutzen, um das Ohr über ein externes Signal, z.B. der Audioanlage, in den gewarnten Zustand zu versetzen.

Der gemessene Schalldruck einer Pkw-Pkw-Frontalkollision innerhalb der Fahrgastzelle gibt nach der Auswertung einen ADU-Wert von 4 bzw. 8 bei einem Spitzenpegel von 146,7 dB(A). Durch diese geringen Werte entsteht für eine betroffene Person kein Risiko einer Hörschädigung und somit keine Verschiebung der Hörschwelle. Im Vergleich zu einem explodierenden Airbag verläuft das Innengeräusch der Frontalkollision über eine längere Zeitspanne und zeitversetzt; das Kollisionsgeräusch erreicht das Ohr ca. 40 ms später als der maximale Schalldruckpegel der Airbag-Explosion (Abb. 4).



**Abb. 4:** Überlagerung von Kollisionsgeräusch und Airbagexplosion

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 Trommelfellrissen und anderen Mittelohrschädigungen führen können oder einen Tinnitus mit sich ziehen, wird aus der Bewertung des Programms nicht sichtbar. Da sich das Auswertungsprogramm auf eine direkt nach der Einwirkung einstellende Hörschwellenverschiebung bezieht, kann aus technischer Sicht keine Aussage über die Zeitspanne eines möglichen Hörverlusts gemacht werden. Eine zusätzliche Beurteilung aus medizinischer Sicht ist somit sinnvoll.