

Spitzenschalldruckpegel bei Arbeitsunfällen mit Knallereignissen

Reimer Paulsen, Sankt Augustin

Zusammenfassung Nach Arbeitsunfällen mit Knallereignissen, wie sie z. B. bei Explosionen oder Platzen von Rohren auftreten, wird im Zuge der Ermittlungen gefragt, wie hoch der Spitzenschalldruckpegel gewesen sei. Wird ein akuter Gehörschaden festgestellt, so muss dieser Wert nach VDI 2058 Blatt 2 den Wert von $L_{AI} = 135$ dB überschreiten, damit der Unfall ursächlich dafür ist. Ein Schallpegelmesser ist in der Regel bei einem Unfall nicht eingeschaltet, aber in manchen Fällen bietet es sich an, solche Ereignisse in einer Laborumgebung nachzustellen. Im vorliegenden Beitrag wird über verschiedene Experimente berichtet, die im Nachgang zu solchen Unfällen im Institut für Arbeitsschutz (IFA) durchgeführt wurden.

Peak sound pressure levels caused by occupational accidents with bangs

Summary After occupational accidents with bangs, e.g. after explosions or bursting tubes, the necessity is given to determine the peak sound pressure level. If the sound level exceeds the limit value of $L_{AI} = 135$ dB according to VDI 2058-2, it is plausible that a hearing damage is caused by the accident. A sound-level meter is not generally in operation when such accidents occur, but in some cases, the solution for such a situation might consist in reconstructing the accident in the laboratory. This article reports several experiments which were carried out at the Institute for Occupational Safety and Health (IFA).

Wenn es während der Arbeit knallt und sich danach eine starke Beeinträchtigung des Hörvermögens zeigt, die auch von einem Arzt bestätigt wird, dann kommt es zu einer Unfallanzeige beim zuständigen Unfallversicherungsträger. Im folgenden Verfahren zur Anerkennung als Arbeitsunfall muss u. a. geklärt werden, ob die physikalischen Randbedingungen erfüllt waren, um ein akustisches Trauma auszulösen.

Die Richtlinie VDI 2058 Blatt 2 [1] nennt für Einzelereignisse einen $L_{AI} = 135$ dB als Wert, ab dem Gehörschäden verursacht werden können. Diesem Effektivwert, gemessen mit der A-Bewertung und der Zeitkonstante Impuls, entsprechen Spitzenschalldruckpegel (Peak) von etwa 150 bis 165 dB. Vor allem diese Pegel sind in der medizinischen Literatur gebräuchlich und weit verbreitet [2].

Nun sind Unfälle unvorhergesehene Ereignisse, bei denen in der Regel kein Schallpegelmesser eingeschaltet ist. Für eine Aussage zu einem Spitzenschalldruckpegel bei dem Unfall sind also Erfahrungswerte, Modellrechnungen oder experimentelle Untersuchungen notwendig, um zumindest die Möglichkeit entsprechend hoher Werte nachzuweisen.

An das Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) sind im Lauf der letzten Jahre immer wieder Anfragen zu Spitzenschalldruckpegeln bei Unfällen verschiedener Art herangetragen worden. Einige dieser Ereignisse konnten experimentell in Laborversuchen nachgestellt werden. Diese Ver-

suche können sicher nicht alle Randbedingungen des Ereignisses nachstellen, zumal diese meistens nicht im Einzelnen bekannt sind, sie lassen aber Aussagen über mögliche Schalldruckpegel zu.

Im Folgenden werden die Versuchsdurchführung und die Ergebnisse zu acht verschiedenen Knallereignissen dargestellt. Diese Untersuchungen wurden im Nachgang zu Unfallanzeigen im IFA durchgeführt, in einem Fall wurden die Schalldruckpegel bei einer Anlagenprüfung in einem Prüfinstitut durchgeführt. Bei den hier dargestellten Untersuchungen handelt es sich um nachgestellte Ereignisse zu Knallen bei platzenden Leitungen und Packungen sowie zu Explosionen bzw. Verpuffungen. Die Zahl der einzelnen Versuche variiert z. T. sehr stark, sie ist abhängig vom verfügbaren Material, vom technischen Aufwand und von der Begrenzung durch die vorhandenen Versuchsbedingungen. Auch konnte bei gut reproduzierbaren Experimenten die Zahl der Versuche gering gehalten werden. Wenn sich die Möglichkeit ergab, wurden die Untersuchungen auf vergleichbare Objekte ausgeweitet, um zusätzlich zur Fragestellung direkt weitere Daten zu gewinnen.

Platzendes Heizungsrohr

Schadensfall

Beim Versuch, einen Winkel aus einem Heizungsrohr auszulösen, zerplatzte das Kupferrohr und verletzte den Monteur schwer. Folge war u. a. auch ein Gehörschaden. Zum Lösen der Hartlot-Verbindung wurde ein Schweißbrenner eingesetzt. Der betroffene Rohrabschnitt war beidseitig abgesperrt, aber offensichtlich nicht vollständig entleert worden. Das im Rohr verbliebene Wasser führte zu einer erhöhten Wärmeableitung, sodass der Vorgang sich zeitlich ausdehnte und die Verbindung sich nicht löste. Das Wasser ging dann offensichtlich in die Dampfphase über, und das Rohr

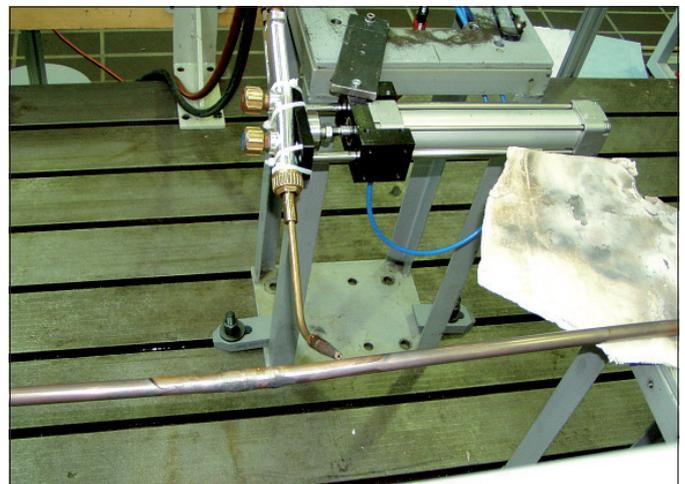


Bild 1 Versuchsaufbau „Heizungsrohr“.

Tabelle 1 Spitzenschalldruckpegel beim Bersten von erhitzten teilweise mit Wasser gefüllten Kupferrohren (Abstand: 3 m).

Versuch	Berstdruck in bar	L_{pCpeak} in dB	L_{Almax} in dB
1	157	154,9	137,6
2	145	161,3	142,3
3	148	156,6	137,2

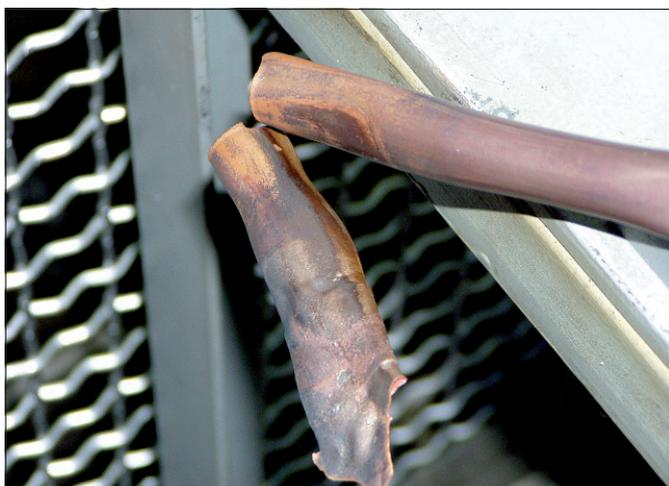


Bild 2 Zerplatztes Heizungsrohr.

platze durch den dabei entstandenen Überdruck. Der Monteur befand sich situationsbedingt auf Armeslänge vom Rohr entfernt.

Versuchsdurchführung

Für die Versuchsdurchführung im Labor wurden 100 cm lange Kupferrohre CU 15 in der Mitte mit einer Muffe versehen. Diese Verbindung wurde mit Hartlot hergestellt. Die Rohre wurden an beiden Enden verschlossen, wobei an einem Ende ein Druckaufnehmer angebracht wurde. Die Rohre wurden zuvor zu etwa 55 % mit Wasser gefüllt. Für den Versuch wurde das Rohr an beiden Enden fest eingespannt. Der Schweißbrenner wurde mit einem Schlitten im mittleren Bereich des Rohrs hin und her bewegt (**Bild 1**). Aus Vorversuchen war bekannt, dass bei diesen Versuchen Drücke von etwa 150 bar entstehen und das Rohr auseinandergerissen wird. Wegen der zu erwartenden hohen Schalldruckpegel und um mechanischen Kontakt auszuschließen, wurde das Mikrofon seitlich in 3 m Entfernung positioniert.

Ergebnisse

Es wurden drei Versuche durchgeführt. Die Ergebnisse waren sehr gut reproduzierbar (**Tabelle 1**).

Bei diesen Berstvorgängen wurden die Rohre auseinandergerissen (**Bild 2**), in manchen Fällen wurden dabei auch Bruchstücke in die Umgebung geschleudert. Im angefragten Fall war der Abstand der betroffenen Person deutlich geringer als der hier realisierte Messabstand, ein für einen akuten Gehörschaden ausreichender Spitzenschalldruckpegel kann damit auf jeden Fall als gegeben angesehen werden.

Berstendes Stahlrohr

Schadensfall

Ein berstendes Stahlrohr in einer Chemieanlage soll Ursache für den Gehörschaden eines Mitarbeiters gewesen sein – er befand sich zu dieser Zeit in etwa 4 m Abstand. Der Unfall geschah bei

Reinigungs- und Prüfarbeiten an einem Leitungssystem, das für 16 bar ausgelegt war. Dabei waren die Rohre mit Wasser gefüllt. Es kann allerdings nicht ausgeschlossen werden, dass auch gasförmiges Medium vorhanden war. Über den Zustand des Rohrs (Korrosion, Alterung) war nichts bekannt. Der normale Betriebsdruck kann wohl als Ursache ausgeschlossen werden. Durch plötzliches Öffnen oder Schließen einer flüssigkeitsführenden Rohrleitung kann es aber zu extrem hohen Drücken (oder Unterdrücken) kommen, die ausreichen, Rohre platzen zu lassen.

Versuchsdurchführung

In einem Berst-Versuchsstand im Institut für Arbeitsschutz (IFA) (**Bild 3**) wurden Versuche durchgeführt, um den Spitzenschalldruckpegel bei berstenden Rohren zu messen. Diese Versuche konnten allerdings nur mit vollständiger Flüssigkeitsfüllung der Rohrabschnitte durchgeführt werden, da in dieser Anlage die notwendigen hohen Drücke nur mit nicht kompressiblen Medien erzeugt werden können.

Das Mikrofon wurde für die Messung des Spitzenschalldruckpegels im Berststand aufgestellt, der Abstand zur Mitte des Untersuchungsobjekts betrug wegen dessen räumlicher Abmessungen nur 1,6 m. Für den Versuch mussten die 30 cm langen Rohrabschnitte, die für diese Experimente zur Verfügung gestellt wurden, mit einem Gewinde versehen werden, um sie in der Anlage anschließen zu können.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Schalldruckpegelmessungen sind in **Tabelle 2** zusammengestellt. Der Berstvorgang erfolgte nach Einschalten der Anlage innerhalb von 8 bis 22 s. Dabei entstand jeweils ein Riss in Längsrichtung von etwa 45 mm Länge (**Bild 4**). Die Messungen waren gut reproduzierbar.

Aufgrund des deutlich größeren Abstands beim untersuchten Unfallgeschehen ist bei einer nur mit Flüssigkeit gefüllten Leitung nicht davon auszugehen, dass der Vorgang geeignet war, einen akuten Gehörschaden hervorzurufen.

Platzender PVC-Schlauch

Schadensfall

Im diesem Fall ging es um mögliche Spitzenschalldruckpegel beim Platzen eines PVC-Schlauchs in einem Abstand von 2 m. Der

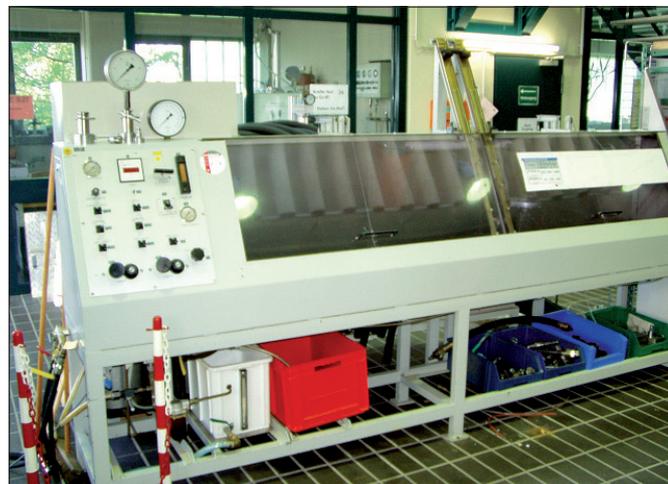


Bild 3 Berst-Versuchsstand.

Tabelle 2 Spitzenschalldruckpegel im Abstand von 1,6 m beim Bersten von mit Wasser gefüllten Stahlrohren (entlüftet).

Versuch	Berstdruck in bar	L_{pCpeak} in dB	L_{Almax} in dB
1	800	147,3	133,1
2	800	147,3	133,5
3	800	147,1	134,4
4	800	147,5	133,6



Bild 4 Geborstene Stahlrohre.

Schlauch, der für Flüssigkeitsdurchleitung vorgesehen war, wurde als Druckluftleitung „missbraucht“ (Betriebsdruck 6 bar). Der Schlauch hatte keine Gewebeeinlage, der Innendurchmesser betrug 22 mm. An die Druckluftanlage wurde er mit Schlauchklemmen angeschlossen. Ein vergleichbarer Schlauchabschnitt wurde zusammen mit der Anfrage zur Verfügung gestellt. Für die Versuche wurden ergänzend ähnliche Schläuche mit Innendurchmessern von 19 und 25 mm beschafft. Die Wandstärke der Schläuche betrug jeweils etwa 3 mm.

Versuchsdurchführung

Für die Versuche wurden Schlauchabschnitte von etwa 80 cm Länge an einem Ende mit einem Stopfen verschlossen und auf der anderen Seite mit einem Kupplungsstück zum Anschluss an die zentrale Druckluftversorgung (9,5 bar) versehen (**Bild 5**). Die



Bild 6 Längsriss im PVC- Schlauch als Ergebnis der platzenden Blase.

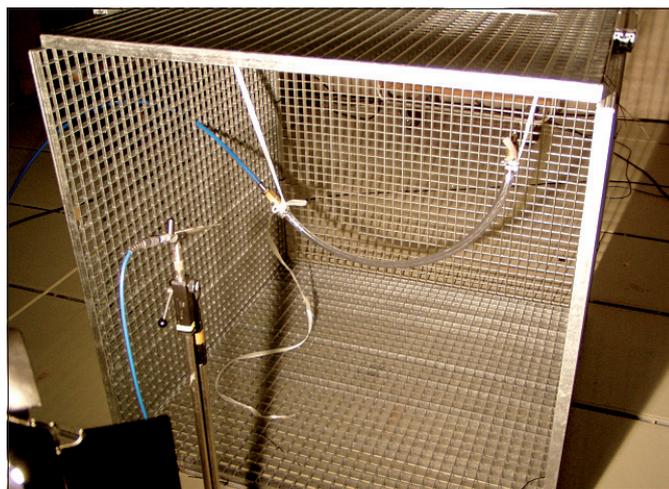


Bild 5 Versuchsaufbau mit PVC-Schlauch.

Messungen wurden im Hallraum des IFA durchgeführt. Die Beobachtung des Versuchsablaufs erfolgte von außerhalb des Raums mithilfe einer Videokamera.

Insgesamt wurden zehn Schlauchabschnitte zum Platzen gebracht. Gemessen wurde in 1 m Abstand zum Objekt. Die Randbedingungen wurden teilweise etwas variiert, um verschiedene Einflussparameter zu beobachten. Die Versuche haben gezeigt, dass die Zeitdauer bis zum Platzen verkürzt werden konnte, indem zwischendurch Lastwechsel durchgeführt wurden (Luftdruck an/aus) und die Umgebungstemperatur erhöht wurde (Fotolampe in 1 m Entfernung).

Mit der Druckzufuhr weitet sich der Schlauchabschnitt zunächst etwas. Diese Weitung ist nicht reversibel. Nach geraumer Zeit (Minuten oder Stunden) beginnt der Schlauch, sich an einem Ende auszudehnen, und es entsteht eine Blase, die dann bei anstehendem Druck unweigerlich platzt. An welchem Ende sich die Blase bildet, war nicht vorhersehbar.

Ergebnisse

Beim Platzen der Blase bildet sich ein Längsriss aus (**Bild 6**). Die in 1 m Entfernung gemessenen Spitzenschalldruckpegel L_{pCpeak} ergaben Werte zwischen 152 und 168 dB (**Tabelle 3**). Die AI-bewerteten Maximalpegel L_{Almax} lagen zwischen 134 und 145 dB. Gemessene Schalldruckpegel und Schlauchabmessungen korrelieren nicht, die Pegelhöhe ist wohl nur von der Größe der sich ausbildenden Blase abhängig.

Tabelle 3 Ergebnisse der Messungen bei platzenden PVC-Schläuchen (Abstand: 1 m).

Schlauchinnen-Ø in mm	Probenlänge in cm	L_{pCpeak} in dB	L_{Almax} in dB
19	90	154,0	134,1
19	80	165,7	140,5
19	90	158,2	136,8
19	180	167,3	143,2
22	80	161,5	140,4
25	90	156,9	137,9
25	90	152,4	136,5
25	90	152,2	135,5
25	80	167,6	145,1
25	80	162,4	141,1



Bild 7 Blockpackung (Tetrapak, 0,2 l) nach dem Zertreten.



Bild 8 Folienpackung (0,2 l) nach dem Zertreten.

Beim Platzen des Schlauchs können also auch noch in 2 m Entfernung Schalldruckpegel entstehen, die einen akuten Gehörschaden verursachen können.

Zerplatzen von leeren Getränkepackungen

Schadensfall

Eine geleerte Getränkepackung (Tetra Pak) (mit Strohalm, 0,2 l Inhalt) wurde im Abstand von 1,5 m neben einem sitzenden Lehrer zertreten. Es gab einen lauten Knall, der beim Lehrer zu Problemen mit dem Gehör führte.

Versuchsdurchführung

Die Messungen wurden im akustischen Halbraum des IFA durchgeführt, gemessen wurde in Ohrhöhe einer sitzenden Person. In diesem Versuch wurden ergänzend zu zwölf Blockpackungen mit einem Rauminhalt von 0,2 l (**Bild 7**) auch zehn Folienbeutel (**Bild 8**) mit gleichem Rauminhalt durch heftiges Darauftreten zum



Bild 9 Messaufbau für Knallkörper im Freien zwischen zwei Gebäudeteilen.

Platzen gebracht. Die Packungen waren leergetrunken und anschließend über den Strohalm wieder aufgeblasen worden.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Messreihe sind in **Tabelle 4** dargestellt. Protokolliert wurde auch, in welche Richtung die Packungen beim Zertreten aufgeplatzt sind, da sich hieraus eine Richtcharakteristik ergibt. Der höchste Wert, der in dieser Versuchsreihe für Blockpackungen erzielt wurde, war ein Spitzenpegel L_{pCpeak} von 143 dB ($L_{AImax} = 122$ dB). Dieser Wert reicht im angefragten Fall als physikalische Ursache für einen akuten Gehörschaden nicht aus. Für die Folienbeutel wurden insgesamt höhere Schalldruckpegel erreicht, hier waren es 147 dB für den L_{pCpeak} und 127 dB für den L_{AImax} .

Explosion eines Knallkörpers

Schadensfall

Ein Feuerwerkskörper wurde von einem Schüler in einem Klassenraum während des Unterrichts nach vorn in Richtung Tafel geworfen. Der Knallkörper explodierte etwa 1 bis 2 m auf dem Boden liegend neben dem Lehrer. Dieses Ereignis führte bei dem Lehrer zu Gehörproblemen, sodass eine Unfallanzeige erfolgte. Um aussagefähige Daten zu möglichen Spitzenschalldruckpegeln zu erhalten, wurden dazu Messungen mit den entsprechenden Feuerwerkskörpern im Labor durchgeführt.

Versuchsdurchführung

Für die Untersuchungen wurde eine Messreihe im Freien zwischen zwei Gebäudeteilen des IFA durchgeführt (**Bild 9**). Zusätzlich zu den beim Unfall verwendeten Feuerwerkskörpertyp (Pyro Cracker) wurden zum Vergleich Kanonenschläge gezündet (**Bild 10**). Die Messungen wurden vor einer reflektierenden Wand ausgeführt, um eine Vergleichbarkeit zur Unfallsituation herzustellen. Gemessen wurde in den Abständen 1 und 2 m in Ohrhöhe einer stehenden Person.

Ergebnisse

Als kennzeichnende Größen für diese Kurzzeitereignisse wurden jeweils der Spitzenschalldruckpegel L_{pCpeak} und L_{AImax}

Packung	geplatzt in Richtung	Anzahl	L_{pCpeak} in dB		L_{AImax} in dB	
			Min	Max	Min	Max
Folienbeutel 0,2 l	Mikro	7	141,1	146,9	122,3	126,6
	gegenüber	3	134,0	136,4	114,7	117,9
Blockpackung 0,2 l	Mikro	3	135,3	139,2	113,5	118,6
	gegenüber	6	124,6	133,7	106,4	115,9
	beide Seiten	3	141,0	142,7	120,4	122,2

Tabelle 4 Wertebereich der gemessenen Schalldruckpegel bei platzen den Getränkepackungen in 1,5 m Abstand.



Bild 10: Verwendete Feuerwerkskörper im Größenvergleich zu einem Kugelschreiber (Mitte: Pyro Cracker).



Bild 11 Prüfaufbau für die Verpuffung von Deospray im Labor.

bestimmt. In **Tabelle 5** sind die Ergebnisse der Messreihe zusammengestellt. Im Untersuchungsfall, in dem Pyro Cracker verwendet wurden, erreichen die Spitzenpegel L_{pCpeak} Werte bis zu 145 dB. Anders sieht es für die größeren Feuerwerkskörper aus, mit ihnen wurden in den gleichen Abständen Spitzenpegel bis zu 155 dB gemessen. Der L_{AImax} bleibt dabei aber noch deutlich unter 135 dB.

Verpuffung eines Deospray-Luft-Gemischs

Schadensfall

Auf einem Bahnsteig sprühten Schüler Deospray in einen dort befindlichen Fahrkartenautomaten und entzündeten das Deospray-Luft-Gemisch dann mit einem Feuerzeug. Das Gemisch verpuffte mit einem Knall und es gab eine Stichflamme. Der Automat wurde bei diesem Vorgang nicht beschädigt. Eine in der Nähe (ca. 3 m) wartende Person hatte in der Folge Hörprobleme und es kam zu einer Unfallanzeige.

Versuchsdurchführung

Für die Untersuchung wurde auf einen Versuchsaufbau zur Ermittlung von Explosionskenngrößen im IFA zurückgegriffen. Er besteht aus einer Stahlkugel mit 20 l Rauminhalt, die in einem Laborabzug steht (**Bild 11**). Aufgrund der räumlichen Bedingungen konnte der Direktschall nur in einem Abstand von 1 m gemessen werden.

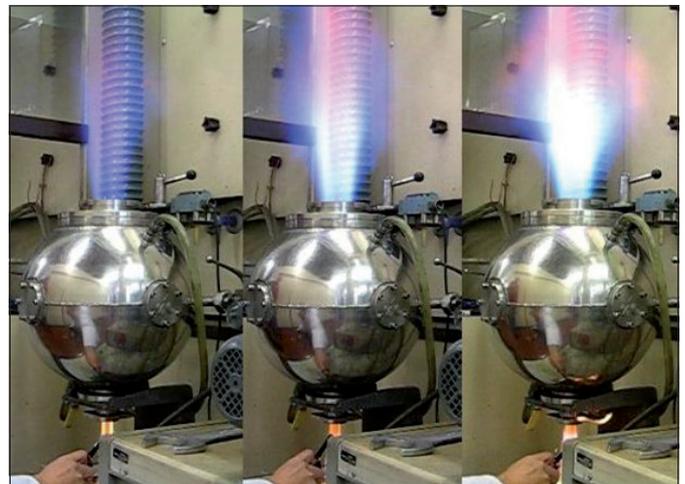


Bild 12 Stichflamme nach den Einsprühzeiten 1, 2 und 3 s (von links nach rechts).

In diesem Versuch blieb die Kugel oben offen. Das Deospray wurde durch diese Öffnung eingesprüht und von unten durch eine weitere Öffnung gezündet. Es wurden drei Versuche durchgeführt, bei denen die eingesprühete Menge über die Zeitdauer variiert wurde (1 bis 3 s). Wegen der stetig wachsenden Flammenhöhe (vergl. **Bild 12**) konnten weitere Versuche im Labor nicht durchgeführt werden, da dies zu einer Beschädigung des Abzugs geführt hätte.

Ergebnisse

In **Tabelle 6** sind die Messergebnisse für die drei Versuche zusammengefasst.

Zwischen eingesprüheter Gasmenge und erzeugten Schalldruckpegeln besteht ein deutlich erkennbarer Zusammenhang. Der C-bewertete Spitzenschalldruckpegel steigt hier um etwa 10 dB je weitere Sekunde eingesprühtes Deospray. Wie weit sich dieser Anstieg fortsetzt, konnte unter den vorhandenen Rahmenbedingungen (Flammenhöhe, Abzug) nicht ermittelt werden. Für den A-bewerteten maximalen Impulsschallpegel zeigt sich mit zunehmender Einsprühzeit ein Anstieg um 8 bis 9 dB

Tabelle 5 Knallkörper: Gemessene Schalldruckpegel beim Versuchsaufbau im Freien.

Knallkörper	L_{pCpeak} in dB		L_{AImax} in dB	
	1	2	1	2
Messabstand in m				
Pyro Cracker	143,6	140,5	120,0	117,9
	143,2	140,6	121,4	118,4
	144,1	140,2	121,5	118,5
	143,7	141,2	119,7	118,8
	145,3	143,2	123,0	121,2
Riesen-Bölller	152,6	150,4	130,4	128,5
	150,1	150,1	127,1	127,5
Superböller	154,8	154,8	131,8	128,5

(Bild 13). Da sich mit längeren Einsprühzeiten die Zusammensetzung des Gemischs verändert, kann eine Extrapolation ohne weitere Versuche nicht vorgenommen werden.

Der Laborversuch stellt keine direkte Nachstellung des Ereignisses dar, er kann aber Anhaltswerte für mögliche Schalldruckpegel bei derartigen Ereignissen liefern.

Explosion eines Elektrolytkondensators

Schadensfall

Bei der Überprüfung einer Stromversorgungsbaugruppe explodierte während der Sichtprüfung ein Tantal-Elektrolytkondensator. Der Abstand des Mitarbeiters zum explodierenden Objekt betrug etwa 20 bis 30 cm. Um die bei solchen Ereignissen auftretenden Schalldruckpegel zu ermitteln, wurden im Labor entsprechende Messungen mit vergleichbaren Kondensatoren durchgeführt.

Versuchsdurchführung

Das Ereignis eines explodierenden Kondensators wird durch Anlegen einer Überspannung herbeigeführt, dies führt im Inneren des Bauteils nach kurzer Zeit zu einem Kurzschluss und damit zu einer Erhitzung. Dabei entsteht ein Überdruck, der das Innere des Kondensators explosionsartig aus dem Becher herausschleudert. Das Innere bei diesen Kondensatoren besteht aus einem Tantalstab und einem Elektrolyten. Die Randbedingungen bei diesem Unfall sollten bei der Messung möglichst weit angeglichen werden.

Da beim Explodieren dieser Kondensatoren die aggressive Elektrolytflüssigkeit austreten kann, wurden die Versuche in einem Laborabzug (Bild 14) bei geschlossener Frontscheibe durchgeführt. Im Abzug beträgt der Hintergrundpegel bedingt durch den Lüfter etwa 64 dB(A).

Die Kondensatoren wurden jeweils auf einer ausrangierten Platine, die für diesen Versuch mit Anschlussbuchsen versehen wurde, befestigt. Der Abstand des Mikrofons zur Platine betrug 50 cm. Dieser Abstand wurde gewählt, um einerseits Übersteuerungen und andererseits Beschädigungen des Mikrofons durch den herausspritzenden Elektrolyten zu vermeiden.

In einem Vorversuch wurden fabrikneue Aluminium-Elektrolytkondensatoren vergleichbarer Kapazität und Spannungsfestigkeit eingesetzt, um den Versuchsaufbau zu prüfen und auftretende Schalldruckpegel abzuschätzen. Diese Kondensatoren unterscheiden sich zwar im Aufbau (gewickelte Folien), bei Überhitzung kann aber auch hier explosionsartig das Innere herausgeschleudert werden.

Im Hauptversuch wurden dann die Tantal-Elektrolytkondensatoren, die von der betroffenen Person zur Verfügung gestellt wurden, verwendet. Diese Kondensatoren entsprachen dem Typ, der den Unfall verursacht hat.

Versuch	L_{pCpeak} in dB	L_{Almax} in dB
1	115,7	89,5
2	126,4	96,4
3	136,4	107,2

Tabelle 6 Deospray: Ergebnisse der Geräuschmessungen (Abstand: 1 m).

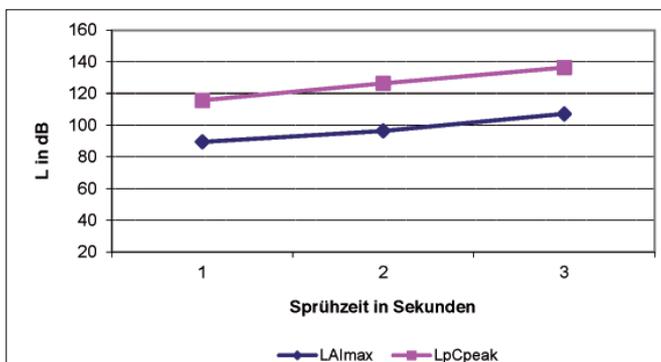


Bild 13 Deospray: Zusammenhang zwischen eingesprühter Gasmenge und Schalldruckpegel.

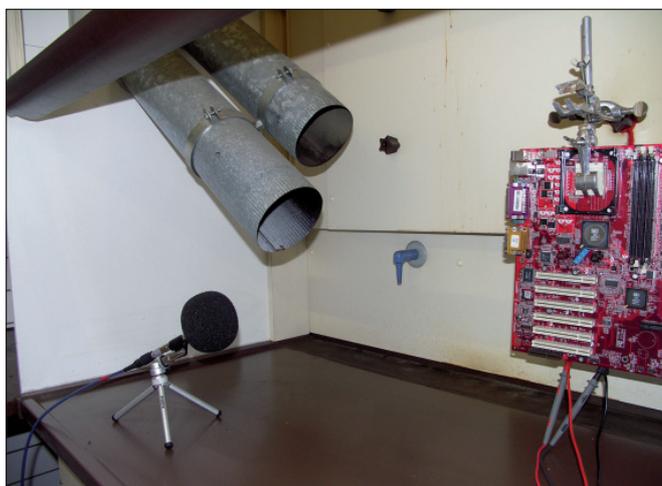


Bild 14 Elektrofilterkondensator: Prüfaufbau im Laborabzug.

Als Spannungsquelle diente ein Labornetzteil mit regelbarer Spannung bis 80 V und einstellbarer Strombegrenzung.

Ergebnisse

Die Ergebnisse der Vor- und der Hauptversuche sind in Tabelle 7 zusammengestellt. Die angelegte Spannung U_{in} betrug jeweils 80 V, als Strombegrenzung wurde 3,1 A eingestellt. Im letzten Versuch (Ta_5) wurde wegen der geringeren Spannungs-

Messung	U_{max} in V	U_{in} in V	C in μF	Explosion nach mm:ss	Explosion	L_{pCpeak} in dB	L_{Almax} in dB
Al_1	35	80	220	01:35	ja	148,7	131,2
Al_2	35	80	470	00:32	nein	120,8	106,5
Al_3	35	80	470	01:19	nein	126,3	103,7
Al_4	35	80	220	05:03	nein	104,8	83,5
Ta_1	30	80	300	00:32	ja	141,7	126,0
Ta_2	30	80	150	00:16	ja	150,3	135,5
Ta_3	30	80	300	00:20	ja	142,3	126,8
Ta_4	30	80	300	00:29	ja	138,4	122,7
Ta_5	15	35 bis 40	540	10:00	ja	134,7	118,9

Tabelle 7 Ergebnisse der Versuche (Messabstand: 50 cm). Al = Aluminium-, Ta = Tantal-Elektrolytkondensator

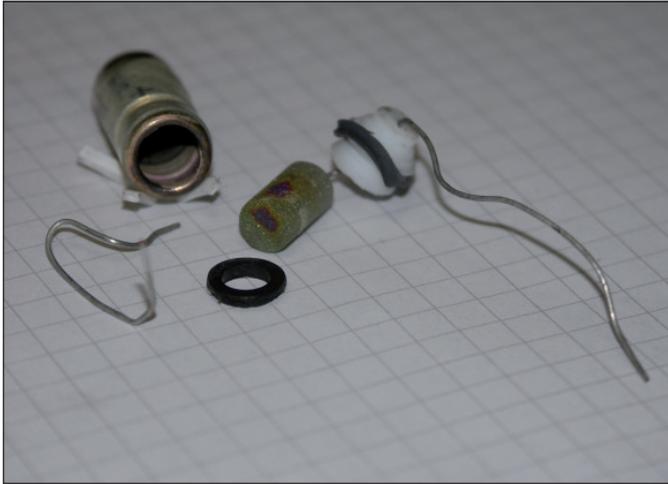


Bild 15 Überreste eines explodierten Ta-Elektrolytkondensators.

festigkeit des Kondensators (15 V) zunächst 35 V und nach 7 min 40 V angelegt.

Bei den Versuchen AI_2 bis AI_4 wurde das Innere nicht herausgeschleudert, hier entwich der Überdruck über die vorhandene Sollbruchstelle mit einem Zischgeräusch. Bei den Tantal-Elektrolytkondensatoren trat die Zerstörung innerhalb von 16 bis 32 s nach Anlegen der Überspannung ein (**Bild 15** zeigt die Überreste eines Ta-Kondensators nach der Explosion), lediglich der letzte Kondensator erwies sich als spannungsfester. Von den fünf Versuchen mit Ta-Kondensatoren wurde in einem Fall ein AI-bewerteter Maximalpegel von mehr als 135 dB gemessen, die anderen Ergebnisse lagen deutlich darunter. Im Sinne einer Worst-case-Abschätzung ist aber von der Möglichkeit gehörgefährdender Maximalpegel bei einem Abstand von 50 cm auszugehen.

Lichtbogen in einem Umrichterschrank

Schadensfall

In Umrichterschrank können unter bestimmten Bedingungen unerwartet Lichtbögen auftreten. Eine Begleiterscheinung der Lichtbögen sind Knalle. Für die Gefährdungsbeurteilung sollten im Rahmen von Typprüfungen in einem Prüfinstitut die dabei auftretenden Spitzenschalldruckpegel ermittelt werden.

Versuchsdurchführung

Die Prüfungen wurden in einer großen Halle mit weit geöffneten Toren durchgeführt. Insgesamt fanden vier Versuche mit entsprechenden Umbauphasen statt. Um die Umrichterschranke herum war eine Matrix von Spannrahmen mit Baumwollstoff aufgestellt, um nach außen schlagende Flammen zu detektieren (**Bilder 16** und **17**). Über den Aufbau wurde eine Decke abgesenkt. Eine Schrankreihe wurde jeweils für zwei Versuche eingesetzt. In den Versuchen wurden verschiedene Schrankausstattungen geprüft. Für die Typprüfung wurden verschiedene Versuchsparameter (Spannung, Strom und Dauer) eingestellt.

Die Mikrofone wurden in den Abständen 5 m vom Schrank (etwa Rand der abgehängten Decke) und 8 m (Hallentor) aufgestellt und die Messgeräte jeweils so kurz wie möglich vor dem Versuch gestartet. Beim Versuch selbst wurde die Umgebung abgesperrt. Alle Teilnehmer am Versuch mussten aus Sicherheitsgründen in ein gegenüberliegendes Gebäude ausweichen.

Ergebnisse

Die eingestellten Versuchsparameter sind zusammen mit den gemessenen maximalen Schalldruckpegeln L_{pCpeak} und L_{Almax} in **Tabelle 8** dargestellt.



Bild 16 Versuchsaufbau mit Mittelspannungsumrichter und davor positionierten Mikrofonen.



Bild 17 Rauchentwicklung direkt nach dem Lichtbogen.

Messung	Spannung in kV	Strom in kA	Dauer in ms	L_{pCpeak} in dB		L_{Almax} in dB	
				5 m	8 m	5 m	8 m
1	7,4	20	500	144,2	143,0	129,0	126,2
2	7,4	20	500	143,7	140,6	127,6	123,8
3	3,6	10	150	138,0	134,2	120,7	116,9
4	7,4	31,5	200	150,1	147,3	135,0	132,5

Tabelle 8 Lichtbogen: Eingestellte Parameter und Ergebnisse der Schalldruckpegelmessungen bei den Lichtbogenversuchen.

Die Ergebnisse zeigen für die eingestellten Versuchsparameter einen linearen Zusammenhang zwischen dem Strom und den maximalen Schalldruckpegeln L_{pCpeak} und L_{Almax} (**Bild 18**). Bei einer Stromstärke von 31,5 kA werden in 5 m Abstand ein Spitzenschalldruckpegel L_{pCpeak} von 150 dB und ein AI-bewerteter Maximalpegel von 135 dB gemessen.

Für die Bewertung in einem Unfallgeschehen kommt dem Abstand eines Betroffenen zum Lichtbogen eine hohe Bedeutung zu, da die Schalldruckpegel in den in dieser Messreihe gewählten Abständen für einen akuten Gehörschaden nicht bzw. nur gerade ausreichend sind. Umrichterschranke stehen üblicherweise in Räumen und dort tätiges Personal hält sich in der Regel näher an den Schränken auf, daher muss bei möglichen Unfällen von höheren Schalldruckpegeln ausgegangen werden.

Zusammenfassende Betrachtung

Die Ergebnisse der Experimente zur Ermittlung von möglichen Spitzenschalldruckpegeln bei Knallereignissen ergeben in fünf von acht Fällen in den realisierten Messabständen eine Überschreitung des Spitzenschalldruckpegels von 150 dB, in zwei Fällen liegen sie bis zu 3 dB darunter. Lediglich bei der Verpuffung eines Deospray-Luft-Gemischs bleibt der Spitzenwert deutlich unter 140 dB. Zu beachten ist hierbei auf jeden Fall die bei den Versuchen technisch realisierbare Messentfernung im Verhältnis zum tatsächlichen Abstand beim Unfall. Für andere Abstände muss eine entsprechende Umrechnung erfolgen. Für die AI-bewerteten Maximalpegel werden in der Hälfte der Fälle 135 dB überschritten. Diese Beobachtung bezieht sich auf die jeweils maximal gemessenen Werte. Da die Streuungen in den Experimenten teilweise sehr groß sind, können hier Ausreißer nach oben den Ausschlag geben (Beispiel Kondensator). Aus der Fragestellung heraus (welche Spitzenschalldruckpegel sind möglich?) sind aber diese Werte heranzuziehen.

Die begutachtenden Mediziner wünschen für ihre Beurteilung in der Regel als Spitzenwert die Angabe des Peakpegels und erwarten hier Werte von 150 bis 160 dB, die sich aus der medizinischen Fachliteratur ergeben. Dies bedeutet einen Unterschied von 15 bis 25 dB gegenüber dem L_{AI} von 135 dB, wie er in der Richtlinie VDI 2058 Blatt 2 angegeben wird. Bei den Untersuchungen wurden jeweils beide Pegel parallel gemessen. Der Vergleich (**Tabelle 9**) zeigt, dass sich bei den untersuchten Ereignissen diese Differenz bestätigt.

Ähnliche Differenzen werden auch bei impulshaltigen Schallergebnissen an industriellen Arbeitsplätzen gefunden [3]. Bei kurzen Impulsen kann also davon ausgegangen werden, dass bei einer Überschreitung des $L_{Almax} = 135$ dB auch der Spitzenschalldruckpegel (Peak) den Wert von 150 dB überschreitet.

Anzumerken bleibt in diesem Zusammenhang, dass mit der Einführung des oberen Auslösewertes $L_{pCpeak} = 137$ dB in der Lärm- und

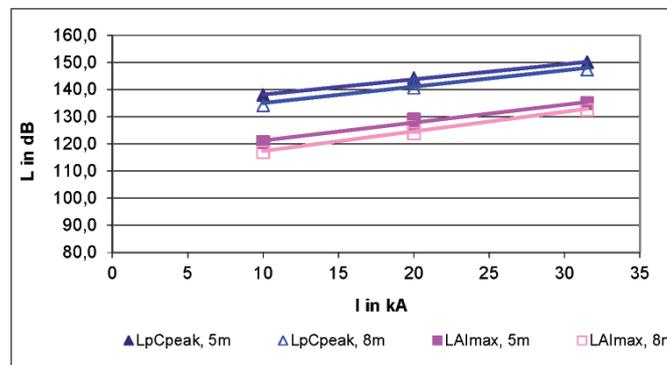


Bild 18 Zusammenhang zwischen eingestellter Stromstärke I und maximalen Schalldruckpegeln in den beiden Messabständen.

Vibrations-Arbeitsschutzverordnung (LärmVibrationArbSchV) [4] häufig angenommen wird, dass ab diesem Wert bereits ein akuter Gehörschaden auftreten kann. Dieser obere Auslösewert, der gleichzeitig der maximal zulässige Expositionswert unter Berücksichtigung der Dämmwirkung eines Gehörschutzes ist, ist eine Präventionsangabe. Für die Verursachung eines akuten Gehörschadens wird dieser Spitzenschalldruckpegel als nicht ausreichend angesehen.



Dipl.-Ing. **Reimer Paulsen**, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin.

Literatur

- [1] VDI 2058 Blatt 2: Beurteilung von Lärm hinsichtlich Gehörfähigung. Berlin: Beuth Verlag 1988.
- [2] Liedtke, M.: Akute Gehörschäden durch extrem hohe Schalldruckpegel. HNO 58 (2010), S. 106-109.
- [3] Maue, J.: Die Bedeutung des Spitzenschalldruckpegels für die Beurteilung industrieller Arbeitsplätze. Sicherheitsingenieur 8 (2009), S. 52-55.
- [4] Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung vom 6. März 2007. BGBl. I, S. 261, zul. geänd. durch Art. 3 der Verordnung vom 19. Juli 2010. BGBl. I, S. 960.

Versuch	Anzahl	Mittelwert	Standardabweichung	Wertebereich
Heizungsrohr	4	18,9	1,1	17,3 bis 19,9
Stahlrohr	4	13,7	0,7	12,7 bis 14,2
PVC-Schlauch	10	20,7	3,0	15,9 bis 25,2
Getränkepackung	25	20,1	1,4	17,8 bis 23,1
Knallkörper	32	22,2	1,5	18,6 bis 26,3
Deospray	3	28,5	2,0	26,2 bis 30,0
Kondensator	9	17,0	2,9	14,3 bis 22,6
Lichtbogen	8	16,2	1,0	14,8 bis 17,3

Tabelle 9 Differenzen zwischen L_{pCpeak} und L_{Almax} .