

Zündwirksamkeit von Ultraschall beim Einsatz in explosionsfähigen Atmosphären

Lars Hendrik Simon¹, Thomas Fedtke², Volker Wilkens², Michael Beyer¹

¹Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Fachbereich 3.7 „Zündquellensicherheit“, Braunschweig

²Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Fachbereich 1.6 „Schall“, Braunschweig

Ultraschall ist nach EN 1127-1:2011 [1] und den Technischen Regeln für Betriebssicherheit (TRBS) 2152 Teil 3 [2] eine von 13 Zündquellenarten. Für den Einsatz in explosionsfähigen Atmosphären ist derzeit ein Grenzwert von 1 mW/mm² festgelegt. Allerdings basiert dieser Grenzwert auf theoretischen Betrachtungen in Analogie zu anderen Zündquellen, zu denen keine aussagekräftigen Veröffentlichungen oder Aufzeichnungen existieren. In Anbetracht neuer Einsatzmöglichkeiten von Ultraschall in der Industrie war es nötig, den bestehenden Grenzwert durch experimentelle und theoretische Untersuchungen zu überprüfen. Dabei ist es erstmals gelungen, mittels Ultraschall explosionsfähige Atmosphären zu zünden [3]. Gleichzeitig haben die Untersuchungen ergeben, dass der bestehende Grenzwert erheblich ausgeweitet werden kann. Insbesondere zeigte sich, dass eine direkte Zündung einer explosionsfähigen Atmosphäre durch den Ultraschall nicht möglich ist. Stattdessen erfolgt die Zündung an der heißen Oberfläche eines durch die Absorption der Ultraschallwelle erwärmten Mediums im Ultraschallfeld. Zudem empfiehlt sich eine Unterscheidung von Ultraschall in gasförmigen und in flüssigen Medien. Für beide Fälle lassen sich technische Maßnahmen feststellen, mit denen die Zündung durch Ultraschall verhindert werden kann.

1 Einleitung

In der EN 1127-1:2011 [1] und den TRBS 2152 Teil 3 [2] wird Ultraschall als eine von 13 Zündquellen genannt und ein Grenzwert von 1 mW/mm² festgelegt. Allerdings basiert dieser Grenzwert auf Analogiebetrachtungen zu anderen Zündquellen anstatt auf experimentellen Untersuchungen. Ferner existieren keine aussagekräftigen Veröffentlichungen oder Aufzeichnungen, die Aufschluss über die Entstehung dieses Grenzwertes geben. Außerdem unterscheidet dieser Grenzwert nicht zwischen der Einkopplung der Schallwelle in ein gasförmiges oder ein flüssiges Medium. Gleichzeitig wird Ultraschall in der Industrie in vielfältigen Bereichen eingesetzt. In der Messtechnik wird er zur Füllstands- sowie der Durchflussmessung oder in der zerstörungsfreien Prüfung zum Aufspüren von Unregelmäßigkeiten im Prüfling verwendet [4]. Starke Luft-Ultraschallfelder lassen sich zum Abscheiden von Stäuben und Partikeln [5], zur Levitation [6] und zur Herstellung von Lacken verwenden [7]. Bei Anwendungen in Flüssigkeiten wird meist die durch Ultraschall angeregte akustische Kavitation ausgenutzt. So lassen sich in der Reinigungstechnik durch die dabei auftretenden Mikroströmungen hohe Oberflächenreinheiten erzielen. In der Prozesstechnik dienen die extremen Bedingungen in und um die Kavitationsblasen unterschiedlichen Zielen. So kann sie zum Homogenisieren, Emulgieren und zum Aufschluss von Zellen verwendet werden. Außerdem beschleunigt die Kavitation den Ablauf chemischer Reaktionen [5, 8, 9].

In vielen der genannten Bereiche kann der Ultraschall in Kontakt kommen zu explosionsfähigen Atmosphären. So stellt sich in Anwendungen bei der Füllstandsmessung in Silos oder in der Abscheidung von Partikeln insbesondere die Frage nach der Zündwirksamkeit von Ultraschall gegenüber Stäuben. In Reinigungsbädern und in der Prozessindustrie wird der Ultraschall zum Teil in brennbaren Flüssigkeiten eingesetzt, wo sich an Flüssigkeitsoberflächen explosionsfähige Dampf-Luft Gemische bilden könnten. Letztlich könnte es in benachbarten gasgefüllten Kavitationsblasen zu Zündungen kommen, die in ein größeres explosionsfähiges Volumen durchschlagen.

Recherchen hinsichtlich Explosionsunfällen, die sich auf Ultraschall als Zündquelle zurückführen lassen, ergaben jedoch, dass keine solchen Unfälle bekannt sind. Auch finden sich in der Fachliteratur keine Quellen, aus denen eine von Ultraschall ausgehende Zündgefahr hervorgeht [10].

Aus dieser Situation folgt, dass allgemein angenommen wird, dass der Grenzwert einen großen Sicherheitsfaktor enthält. Dieser Sicherheitsfaktor wird als ein Hemmnis für Innovationen bei Anwendungen von Ultraschall empfunden, schafft jedoch keine zusätzliche Sicherheit, wenn nichts über seine tatsächliche Größe und Ausprägung bekannt ist. Deswegen war es notwendig, die Zündquelle Ultraschall neu zu untersuchen und eine Datenbasis zu schaffen, die nun eine sicherheitstechnische Neubewertung ermöglichen. Zentrale Fragestellung war, ob sich überhaupt durch Ultraschall Explosionen hervorrufen lassen und wenn ja, mit welchen Maßnahmen solche Zündungen ausgeschlossen werden können. Dabei wurde nur das Ultraschallfeld selbst betrachtet. Zündgefahren, die durch die mechanischen und elektrischen Komponenten bei der Erzeugung des Ultraschalls entstehen, sind nicht Teil der Untersuchung, da sie andere Zündquelle betreffen (z.B. elektrische Ausgleichsströme, elektrische Anlagen, mechanische Funken, heiße Oberflächen an).

Erstmals wurden mittels Ultraschall Zündungen von explosionsfähigen Atmosphären ausgelöst. Die Bedingungen, unter denen sich Zündungen erzeugen lassen, sind jedoch extrem, sodass sich Maßnahmen formulieren lassen, mit denen Zündungen durch Ultraschall ausgeschlossen werden können. Diese sollen im vorliegenden Artikel dargestellt werden.

2 Ultraschall bei Einkopplung in gasförmige Medien

2.1 Theoretische Betrachtungen

Grundsätzlich erfolgt die Ausbreitung von Ultraschall in Fluiden, d.h. Gasen und Flüssigkeiten, den gleichen Gesetzmäßigkeiten [11]. Allerdings ist der Erzeugung hoher Schallpegel in gasförmigen Medien auf Grund des großen Impedanzunterschiedes zwischen Sender und Gas technische Grenzen gesetzt. Dieser Effekt spielt mit wachsender Frequenz eine immer größere Rolle, da für hohe Frequenzen immer kleinere piezoelektrische Schichten erforderlich sind [4], die nur begrenzt hohen Spannungen ausgesetzt werden können. Gegenüber Flüssigkeiten ist dieser Effekt weniger kritisch, da die Ankopplung an die Flüssigkeit mit geringeren Verlusten behaftet ist.

Für Erzeugung hoher Schalldrücke werden in Luft „Hörner“ auf den Schallwandler aufgebracht, die eine Schallschnelletransformation bewirken und als Sonotroden bezeichnet werden [4]. Diese müssen jedoch einem vielfachen der halben Wellenlänge entsprechen, sodass die Abmessungen für hohe Frequenzen sehr klein ausfallen müssten. Dies wirkt sich negativ auf die abgestrahlte Leistung aus. Gleichzeitig muss das Material der Sonotrode die inneren Spannungen verkraften, was die Erzeugung hoher Schallschnellen und -drücke begrenzt. Aus diesen Gründen werden für Leistungsanwendungen in Gasatmosphären Frequenzen von einigen 10 kHz mit Wellenlängen im Zentimeterbereich gewählt. Dadurch ist jedoch eine Fokussierung der Schallwelle auch auf diese Größenordnung begrenzt.

Durch Resonanzüberhöhung lassen sich in Stehwellenfeldern maximale Schalldrücke erzielen. Zudem lässt sich rechnerisch zeigen, dass die Erwärmungsraten in einem absorbierenden Medium in Stehwellenfeldern die in fortschreitenden Wellen übertreffen. Die stärkste Erwärmung tritt dabei im Druckbauch der stehenden Welle auf [12, 13]. Die Dämpfung in Gasen und Aerosolen ist jedoch gering [14, 15, 16], sodass eine direkte Entzündung eines Brennstoff-Luft Gemisches durch den Ultraschall ausgeschlossen werden kann. Sind jedoch Stoffe im Schallfeld vorhanden, die eine ähnliche Impedanz wie die umgebende Atmosphäre und eine hohe Schallabsorption vereinen, können diese sich im Extremfall so stark erwärmen, dass es zu einer Zündung an ihrer heißen Oberfläche kommt.

Diese Voraussetzungen sind insbesondere für poröse Stoffe mit offenen Poren (z.B. Schaumstoffe, Mineralfasern) erfüllt, da sie eine geringe Dichte aufweisen, der Schall durch die Poren in Körper eindringen kann und diese Stoffe eine hohe Strömungsresistenz aufweisen [17]. Allerdings werden Medien mit größerer Dichte als der Umgebung (d.h. dem Gas) durch Kräfte im Stehwellenfeld in die Schalldruckknoten bewegt, was in der akustischen Levitation ausgenutzt werden kann [6]. Dies sind jedoch gleichzeitig Bereiche minimaler Erwärmungstaten [12].

Als Worst-Case-Situation wird daher erachtet, dass mittels einer Sonotrode im unteren Ultraschall-Frequenzbereich ein resonantes Stehwellenfeld erzeugt wird, in dem ein poröser Absorber, der im Druckbauch befestigt ist, die akustische Energie in Wärme umwandelt [13]. Schematisch ist dies in Abbildung 1 dargestellt.

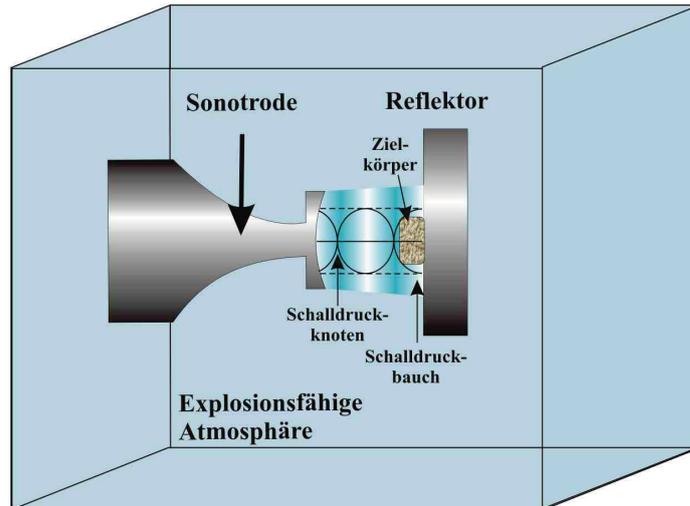


Abbildung 1: „Worst-Case“ Situation bzgl. der Zündwirksamkeit von Ultraschall bei direkter Einkopplung in eine explosionsfähige Atmosphäre

2.2 Experimentelle Untersuchungen

Die im vorherigen Abschnitt beschriebenen „Worst-Case“ Bedingungen wurden für die experimentellen Untersuchungen in einen Versuchsaufbau zur Durchführung von Zündversuchen umgesetzt. Dieser ist in Abbildung 2 dargestellt. Als Versuchsgefäß wurde ein zweckmäßig modifiziertes Hartmann-Rohr verwendet, wie es als Standard – Verfahren zur Bestimmung der Mindestzündenergie von Stäube eingesetzt wird. Die sonst als Zündquelle dienende Elektrodenanordnung wurde durch einen Ultraschallstehwellenerzeuger, bestehend aus einer für Luft-Ultraschall designten Leistungs-Sonotrode und einem Reflektor, ersetzt. In die Oberfläche des Reflektors war ein dynamischer Drucksensor (PCB Piezotronics Drucksensor Modell 112A22) zur Messung des Schalldruckpegels integriert, angeschlossen an einen breitbandigen Messverstärker (Bruel&Kjær, Modell 2610). Der Schalldruckpegel wird in Dezibel (dB) angegeben, d.h. als logarithmische Größe des Verhältnisses von gemessenem Schalldruck p zum Schalldruck der Hörschwelle von $20 \mu\text{Pa}$: $L_p = 20 \cdot \log(p/20 \mu\text{Pa})$. Auf der Oberfläche ließ sich ein Zielkörper mit integriertem Thermoelement (Typ K) fixieren. Mit dieser Vorrichtung ließ sich in Voruntersuchungen eine Korrelation zwischen Temperatur und Schalldruckpegel bei Erzeugung von stehenden Wellen feststellen.

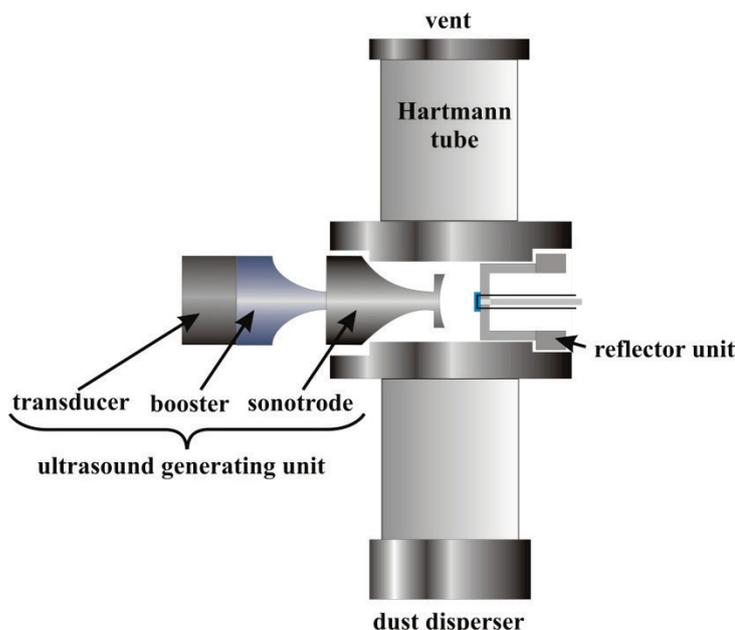


Abbildung 2: Umsetzung der Worst-Case-Situation bzgl. der Zündwirksamkeit von Ultraschall bei direkter Einkopplung in eine explosionsfähige Atmosphäre in einem Hartmann-Rohr

An der Unterseite des Hartmann-Rohrs befindet sich ein Zerstäuberpilz, der durch einen Druckstoß eingefüllten Staub aufwirbeln kann. Für Versuche mit Brenngas-Luft Gemischen wurde dieser Zerstäuberpilz gegen einen Anschluss an eine Gemischaufbereitung ausgetauscht. An der Oberseite des Hartmann-Rohres befindet sich ein Deckel, der als Druckentlastung dient und an ein Zählwerk angeschlossen ist. Im Fall eines durch eine Zündung hervorgerufenen Druckanstieges öffnet sich der Deckel, was vom Zählwerk registriert wird. Für die Zündversuche wurden die Stäube entsprechend Tabelle 1 verwendet.

Tabelle 1: Verwendete Stäube hinsichtlich Korngröße und Zündtemperatur

Staub	Median der Korngröße	Zündtemperatur nach Norm
Schwefel	30 μm	250 °C
Calciumstearat	<10 μm	400 °C
Maisstärke	10 μm	380 °C
Aluminium	17 μm	590 °C
Magnesium	70 μm	600 °C

Als Zielkörpermaterial wurde nach Voruntersuchungen eine Erdalkali-Silikatwolle ausgewählt (Produktname Insulfrax) [13]. Untersucht wurde zudem die Temperaturentwicklung in Zielkörpern aus Steinwolle, einem Melaminharzschaumstoff (Produktname Basotect), sowie Gips. Die Körper hatten würfelförmige Abmessungen mit Kantenlängen von 5 mm und 10 mm. Zudem wurde die Position des jeweiligen Zielkörpers im Ultraschallstehwellenfeld variiert, um die Auswirkung der Position auf die Erwärmung nachzuvollziehen.

Für die Zündversuche wurde die jeweilige Staubart in den Zerstäuberpilz des Hartmann-Rohres gefüllt. Dann wurde der Ultraschall eingeschaltet und der Zielkörper bei einem bestimmten Schalldruckpegel bis zum Erreichen einer Gleichgewichtstemperatur erwärmt.

Dann wurde der Staub mittels eines kurzen Druckstoßes aufgewirbelt, sodass er in unterschiedlichen Konzentrationen durch das Ultraschallfeld vorbei am erwärmten Zielkörper vorbeistrich. Im Fall einer Zündung wurde der Ultraschallpegel abgesenkt. Im Fall einer Nichtzündung wurde der Zündversuch bei gleichen Einstellungen wiederholt, bis eine Zündgrenze festgestellt werden konnte.

Auf die gleiche Weise wurden auch Zündversuche mit Gasen durchgeführt. Verwendet wurden Schwefelkohlenstoff-Luft bei einer Konzentration von 6 %, Diethylether-Luft bei einer Konzentration von 12,5 %, sowie n-Heptan und n-Pentan jeweils bei einer Konzentration von 4 %. Die Konzentrationen ergaben sich aus den Untersuchungen von Welzel [18], in denen Zündversuche mit durch optische Strahlung erwärmten Zielkörpern aus schwarzem Eisenoxid durchgeführt wurden.

2.3 Ergebnisse

Die Voruntersuchungen ergaben unterschiedlich starke Erwärmungen in den unterschiedlichen Zielkörpern. Die höchsten Temperaturen von mehreren 100°C stellten sich bei der Erdalkali-Silikat Wolle ein. Ähnlich stark erwärmte sich der Melaminschaumstoff. Die Steinwolle erreichte immer noch über 200°C, jedoch waren dazu höhere Schalldruckpegel erforderlich. Für Gips wurden auch bei maximalem Schalldruckpegel nur Werte unterhalb von 100°C gemessen.

Hinsichtlich der Position des Zielkörpers im Ultraschallstehwellenfeld zeigten alle Materialien einen qualitativ gleichen Verlauf: Jeweils bei Positionierung in einem Schalldruckbauch des Stehwellenfeldes wurden die maximalen Temperaturen erreicht. In den Schalldruckknoten zeigte sich nur eine schwache Erwärmung. In den Übergangsbereichen stieg die Temperatur steil an, je näher der Zielkörper an den Schalldruckbauch herangerückt wurde. Die Erwärmung der Zielkörper auf die Gleichgewichtstemperatur dauerte stets einige Sekunden. Aus Schlierenaufnahmen wird deutlich, dass sich mit zunehmender Temperatur durch Konvektion eine sehr starke, nach oben gerichtete turbulente Strömung einstellt, die die offenporigen Zielkörper durchströmt und sie ohne Fixierung aus der Position im Schalldruckbauch heraus drücken würde.

Die Zündversuche lieferten nur für Schwefelstaub Zündungen ab einem Schalldruckpegel von 178 dB und Gleichgewichtstemperaturen des Zielkörpers oberhalb von 299°C, gemessen im Kern des Zielkörpers. Für alle anderen Stäube konnten keine Zündungen beobachtet werden. Allerdings zeigten Maisstärke und Calciumstearat verkohlte Rückstände an der Zielkörperoberfläche [13]. Bei den Metallstäuben Aluminium und Magnesium war dies nicht erkennbar. Allerdings ließen sich mit der verwendeten Anlage selbst bei maximalen Schalldruckpegeln bis 185 dB nicht die Normzündtemperaturen von 590°C bzw. 600°C erreichen.

Die Zündversuche in Brenngas-Luft Gemischen lieferten lediglich Zündungen von Schwefelkohlenstoff bei Schalldruckpegeln über 180 dB und Temperaturen von über 350°C. Alle anderen Brenngase konnten trotz Temperaturen oberhalb von 400°C nicht gezündet werden.

2.4 Diskussion der Ergebnisse und sicherheitstechnische Schlussfolgerungen

Die Versuche haben gezeigt, dass es bei Überschreitung von Schalldruckpegeln von 177 dB (re. 20 µPa) durch Absorption der akustischen Energie und Transformation in Wärme in akustisch absorbierenden Körpern zu Zündungen an der heißen Oberfläche dieser Körper kommen kann. Die Zündquelle Ultraschall bei direkter Einkopplung in gasförmige Medien weist dabei jedoch insbesondere gegenüber Gasen und Dämpfen eine geringe Effektivität auf, was aus der Tatsache folgt, dass von den verwendeten Gasen nur Schwefelkohlenstoff gezündet werden konnte, weit oberhalb der Normzündtemperatur von 95°C [19].

Schwefelstaub hat im Vergleich zu anderen Stäuben eine geringe Zündtemperatur von 250°C. Diese musste lediglich um ca. 50 K überschritten werden, um eine Zündung zu erzielen. Die höhere Effektivität gegenüber Stäuben kann darauf zurückgeführt werden, dass Stäube wegen ihrer Masse träger sind als Gase bzw. Dämpfe und dadurch von der Turbulenz im Schallfeld weniger stark betroffen zu sein scheinen.

Neben der Anwesenheit eines schallabsorbierenden Körpers und der Erzielung hoher Schalldruckpegel müssen weitere Bedingungen erfüllt sein, damit der Ultraschall zündwirksam werden kann. So war die Erwärmung der Zielkörper bei Positionierung in den Schalldruckbäuchen eines resonanten Stehwellenfeldes maximal, während in Richtung Schalldruckknoten die Erwärmung immer geringer ausfiel. Dies steht in guter Übereinstimmung mit den theoretischen Überlegungen aus Abschnitt 2.1.

Für die Bewertung der Zündgefahr ist dieser Umstand deshalb wichtig, da die Kräfte im Stehwellenfeld Festkörper in den Schalldruckknoten bewegen, wenn diese nicht im Schalldruckbauch befestigt sind. Allerdings könnte dies an einer Reflektoroberfläche unbeabsichtigt geschehen. Zudem könnte auch ein überwiegend im Schalldruckknoten befestigter Körper, dessen Ränder in den Schalldruckbauch hineinragen, sich in diesen Bereichen stark erwärmen.

Neben der Position im Stehwellenfeld hat auch die Auswahl des Zielkörpers einen großen Einfluss auf die Zündgefahr. Die verwendeten Materialien waren allesamt porös. Dabei war allerdings Faserstruktur der Erdalkali-Silikat Wolle gegenüber der Steinwolle deutlich feiner gewebt. Der Zielkörper aus Gips wies die geringste Erwärmung auf bei gleichzeitig geringster Porosität. Dies spricht dafür, dass diese Größe in engem Zusammenhang mit der Absorption und um Wandlung der Schallenergie in Wärme steht, was mit der Absorptionstheorie in Einklang steht [17].

Auf dieser Grundlage sollten insbesondere Stoffe hoher Porosität wie Schaumstoff oder faserige Materialien wie Wollen oder Filze in Schallfeldern mit Schalldrücken der in den Untersuchungen erzielten Größenordnung oberhalb von 170 dB vermieden werden, wenn es ständig, im Fehlerfall, bei vorhersehbarem Fehlgebrauch oder während Wartungsvorgängen Kontakt zu explosionsfähigen Atmosphären bestehen kann. Kann jedoch eine Beschallungsdauer des absorbierenden Körpers von mehreren Sekunden ausgeschlossen werden, besteht keine Gefahr durch den Ultraschall.

Entsprechend der Darstellung des Versuchsaufbaus im Hartmann-Rohr (Abbildung 2) wurde der Schalldruckpegel gemessen mit einem breitbandigem Messaufnehmer, der in die Reflektoroberfläche integriert ist. Für frei in den Raum abstrahlende Ultraschallwandler sollte der Schallpegel mit einem breitbandigen Messaufnehmer an der Grenze zwischen Nah- und Fernfeld gemessen werden. Für einen zylindrischen Wandler, dessen abstrahlende Fläche einen Durchmesser D aufweist und Schall einer Wellenlänge λ emittiert, kann die Grenze zwischen Nah- und Fernfeld abgeschätzt werden [4] durch $(D^2 - \lambda^2)/4\lambda = D^2/4\lambda$. Wird das Schallfeld zusätzlich durch Verwendung von Stufenwandler entsprechend [5] eine Fokussierung erzielt, ist der Schalldruckpegel im Fokus maßgeblich.

Zusammenfassend lässt sich schließen, dass Ultraschall nicht zündwirksam werden kann, wenn der Schalldruckpegel im ganzen Schallfeld 170 dB nicht überschreitet, da dann keine kritischen Temperaturen am Absorber erreicht werden können. In diesem Grenzwert ist ein Sicherheitsabstand von 6 dB enthalten, der einer Halbierung des Schalldruckpegels entspricht (vgl. Abschnitt 2.2). Dabei ist eine Messunsicherheit von 2 dB und ein Absorptionsgrad des Zielkörpers von 100% berücksichtigt. Kann dieser Wert nicht eingehalten werden, ist zu verhindern, dass schallabsorbierende Körper (in der kritischen Position), wie insbesondere faserige Stoffe oder Schaumstoffe, Beschallungszeiten größer als 1 s ausgesetzt werden.

3 Ultraschall bei Einkopplung in flüssige Medien

3.1 Fokussierung der Schallwelle im MHz – Bereich

3.1.1 Theoretische Betrachtungen

In flüssigen Medien ist die Erzeugung von Ultraschall hoher Schallpegel sowohl im kHz-Bereich als auch im MHz-Bereich möglich. In letzterem liegt die Wellenlänge im Bereich von 1 mm, sodass eine scharfe Fokussierung möglich ist und sich z.B. mit konkav geformten Wandlern leicht Intensitäten von mehreren W/mm^2 erzeugen lassen. Um eine explosionsfähige Atmosphäre oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche zu zünden wie sie typischerweise in Ultraschallreinigungsbädern mit Lösemitteln auftreten, müsste die Schallwelle die Phasengrenze flüssig-gasförmig überwinden, an der sie jedoch zu etwa 99% reflektiert wird. Dies folgt aus dem großen akustischen Impedanzsprung an dieser Grenze. Zudem führt der eine intensive Schallwelle begleitende Schallstrahlungsdruck zu einer Zerstäubung der Flüssigkeitsoberfläche. Dadurch überschreitet die Atmosphäre oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche die obere Explosionsgrenze, sodass keine Zündung möglich ist.

Durch einen an der Flüssigkeitsoberfläche festsitzenden Körper, der die Ultraschallwelle absorbiert, kann eine heiße Oberfläche ausgebildet werden, die direkt mit der explosionsfähigen Atmosphäre an der Flüssigkeitsoberfläche in Kontakt kommt. Erforderlich ist ein Medium, das akustisch an die Flüssigkeit angepasst ist und den Ultraschall absorbiert. Feststoffe mit einer ähnlichen Impedanz wie Wasser oder brennbare Flüssigkeiten sind z.B. Harze, Kunststoffe, Alkalimetalle, Gips, Knochen, Erdalkalimetalle, Bitumen [20]. Geeignet zur Absorption sind insbesondere Kunststoffe, da ihre akustische Impedanz nahe der von Flüssigkeiten liegt und sie viskoelastische Eigenschaften aufweisen, die zu einer effektiven Umwandlung der Schwingungsenergie in Wärme führen.

Ein weiterer Vorteil von Kunststoffen ist ihre geringe Wärmeleitfähigkeit. Da der Ultraschall nicht an der Oberfläche sondern im Inneren des Zielkörpers absorbiert wird, lässt sich somit eine lokale Erwärmung wenig unterhalb der an die Atmosphäre angrenzenden Zielkörperoberseite erzielen, die durch das umgebende Material gegen die kühlende Flüssigkeit thermisch isoliert ist.

Viele Kunststoffe besitzen Schmelztemperaturen im Bereich von 150 °C, sodass sich keine für eine Zündung aussichtsreiche Temperaturen erzielen lassen. Allerdings gibt es spezielle Kunststoffe mit Schmelztemperaturen im bis 350 °C.

Andere Medien mit schlechter akustischer Anpassung an die Flüssigkeit (z.B. Metalle, Glas, Keramik [20]) weisen eine zu starke Reflektion auf, als dass die Schallwelle in das Medium eindringen könnte. Wäre die Impedanzanpassung gegeben bei gleichzeitigem geringen Absorptionskoeffizienten des Zielkörpers, würde die Schallwelle an der Phasengrenze zur Gasatmosphäre reflektiert und ebenfalls zurück in die flüssige Phase laufen, ohne dass es zu einer signifikanten Erwärmung des Körpers kommt.

Für die Absorption ist zusätzlich zu einem hohen Absorptionskoeffizienten notwendig, dass der Zielkörper in Ausbreitungsrichtung der Ultraschallwelle die Größenordnung einer Wellenlänge hat.

Aus diesen Überlegungen ergibt sich die Worst-Case-Situation für Ultraschall im MHz-Bereich in Flüssigkeit nach Abbildung 3.

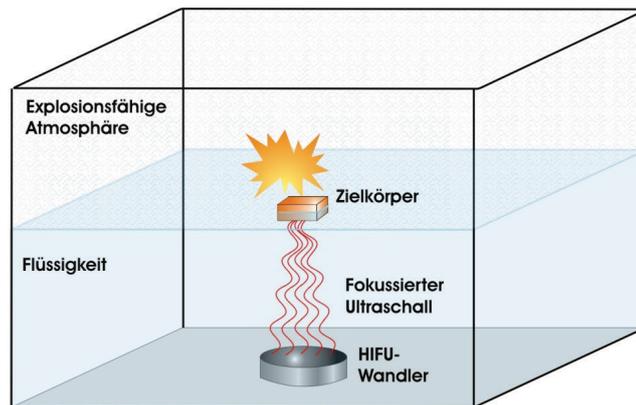


Abbildung 3: Worst-Case-Situation für die Zündwirksamkeit von in Flüssigkeit eingekoppelt Ultraschall bei MHz –Frequenzen

3.1.2 Experimentelle Untersuchungen

Die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Worst-Case Bedingungen wurden für die experimentellen Untersuchungen in einen Versuchsaufbau zur Durchführung von Zündversuchen umgesetzt. Als Ultraschallquelle wurde ein hochintensiver fokussierender Ultraschallwandler (HIFU-Wandler, SonicConcept, Model H-101 1,1 MHz) verwendet. Als Zielkörpermaterialien wurden in Vorversuchen Gips, Graphit, Polymethylmethacrylat (PMMA) sowie Polyetheretherketon PEEK) verwendet und hinsichtlich ihrer Erwärmung bei Beschallung durch den HIFU-Wandler untersucht. Dabei wurde der jeweilige Zielkörper auf den Wandler zu gefahren und mit einem Thermoelement die Temperatur im Kern des Zielkörpers gemessen. Das Thermoelement war zu diesem Zweck durch eine Senkbohrung auf der schallabgewandten Seite in den Zielkörper gesteckt.

Die Umsetzung der Worst-Case-Situation aus Abbildung 3 in einen Versuchsaufbau für Zündversuche ist in Abbildung 4 dargestellt.

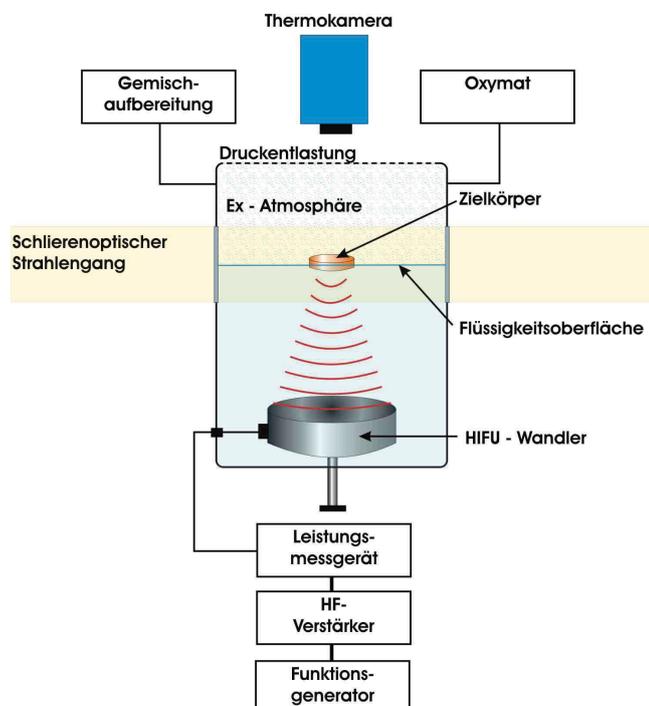


Abbildung 4: Umsetzung der Worst-Case-für die Zündwirksamkeit von in Flüssigkeit eingekoppelt Ultraschall bei MHz –Frequenzen in einen Versuchsaufbau

Der HIFU-Wandler beschallt den an der Flüssigkeitsoberfläche befestigten Zielkörper, dessen Oberseite an eine explosionsfähige Atmosphäre angrenzt. Diese wird von einer Gemischaufbereitung in der gewünschten Konzentration in das Versuchsgefäß eingeleitet. Mithilfe eines paramagnetischen Sauerstoffanalysators (Oxymat 6, Siemens) wurde das Gemisch im Versuchsgefäß überprüft. Nach oben ist das Gefäß durch eine dünne Kunststoffolie abgeschlossen, die im Fall einer Zündung als Druckentlastung dient. Durch diese Folie hindurch wurde die Oberflächentemperatur des Zielkörpers mit einer Thermokamera gemessen. Der Emissionsgrad des Zielkörpers sowie der systematische Messfehler durch die Folie wurden in Vorversuchen bestimmt. Außerdem wurde mittels einer Strahlungskraftwaage die akustische Leistung in Abhängigkeit von der elektrischen Eingangsleistung gemessen und ein Umrechnungsfaktor bestimmt. In den Zündversuchen wurde dann elektrische Eingangsleistung des HIFU-Wandler durch ein Leistungsmessgerät aufgenommen und die akustische Leistung über den Umrechnungsfaktor bestimmt.

Die Vorgänge im Versuchsgefäß konnten durch Fenster in den Seitenwänden aufgenommen werden. Dazu wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera verwendet. Zudem wurde ein schlierenoptischer Strahlengang verwendet, um Dichteunterschiede durch das Schallfeld und durch Wärmekonvektion sichtbar zu machen.

Als Flüssigkeit wurde demineralisiertes und physikalisch entspanntes Wasser verwendet und die explosionsfähige Atmosphäre, wie oben beschrieben, von außen eingeleitet wurde. Gegen die Verwendung von brennbaren Flüssigkeiten, an deren Oberfläche sich eine explosionsfähige Atmosphäre durch Verdampfen ausbilden könnten, sprachen insbesondere zwei Argumente: erstens wäre so eine Atmosphäre weder von außen einstellbar noch hinsichtlich ihrer Schichtung und Zündwilligkeit beherrschbar. Je nach Temperatur und Flüssigkeit könnte an der Zündquelle sogar die obere Explosionsgrenze überschritten werden. Zweitens müsste wegen der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit vom Medium das Schallfeld für jede Flüssigkeit einzeln charakterisiert werden. Dies wäre zu aufwändig und nur bedingt möglich, da aggressive Lösemittel Messtechnik sowie HIFU-Wandler beschädigen könnten und die Messmittel derzeit nur für Wasser kalibriert werden können.

Zur Versuchsdurchführung wurde das Versuchsgefäß 5 min mit dem Brenngas-Luft Gemisch gespült und nach Erreichen der richtigen Konzentration Thermokamera, Hochgeschwindigkeits- und Spiegelreflexkamera auf Aufnahme geschaltet. Anschließend wurde der Zielkörper durch den Ultraschall beschallt, bis es zu einer Zündung kam oder keine signifikante Temperaturerhöhung an der Zielkörperoberfläche mehr festgestellt werden konnte. Die Versuchsdauer bei einer Nichtzündung betrug 3 Minuten. Als Gase verwendet wurden Schwefelkohlenstoff (Normzündtemperatur 95°C, Normspaltweite 0,37 mm [19]) im bei Konzentrationen von 2 % bis 10 % in Luft, sowie Diethylether (Normzündtemperatur 175°C, Normspaltweite 0,87 mm [19]) bei Konzentrationen von 9 % bis 13 % in Luft. Die Konzentrationen ergaben sich wiederum auf Grundlage der Untersuchungen von Welzel [18].

3.1.3 Ergebnisse

In den Vorversuchen zeigte sich entsprechend der theoretischen Überlegungen, dass sich die Kunststoffe bei Beschallung durch den HIFU-Wandler deutlich erwärmten. Die im Inneren der Proben gemessenen Temperaturen erreichten mehrere hundert Grad Celsius. Dabei wurde die Schmelztemperatur von PMME deutlich überschritten. Erklären lässt sich dies damit, dass der Leistungseintrag durch den Schall so groß ist, dass das Material überhitzt wird. Auch für PEEK konnten Temperaturen von einigen hundert Grad gemessen werden. In beiden Fällen wurden die Thermoelemente aus der Senkbohrung gedrückt, als Resultat des mit der Temperaturerhöhung verbundenen Druckanstiegs im Zielkörper.

Für Graphit und Gips konnte nur ein geringer Temperaturanstieg gemessen werden. Obwohl Gips akustisch ähnlich gut angepasst ist wie die Kunststoffe, kommt es in diesem Fall offenbar zu einer deutlich geringeren Absorption.

Für die Zündversuche wurde PEEK verwendet, da PMMA geringere Oberflächentemperaturen aufwies. Dies ist damit zu erklären, dass das Material kurzzeitig überhitzt werden kann, aber oberhalb von 150°C schmilzt und sich zersetzt. PEEK erwies sich wegen seines höheren Schmelzpunktes von 350°C als geeignetstes Material für die Zündversuche.

Bei der Bestrahlung des PEEK-Zielkörpers an der Flüssigkeitsoberfläche in der Versuchsanordnung nach Abbildung 4 erwärmte sich der Zielkörper in Abhängigkeit von der verwendeten Ultraschalleistung auf Werte von über 500°C bei ca. 50 W. Bei der Erwärmung kam es zu einer eruptionsartigen Bildung von Blasen aus geschmolzenem Kunststoff an der Zielkörperoberseite, während die an Wasser grenzende Seite des Zielkörpers intakt blieb. Dabei wurden sowohl bei Schwefelkohlenstoff als auch Diethylether Zündungen beobachtet. Für Schwefelkohlenstoff lag die Grenze bei 6 W und Temperaturen von 290°C, für Diethylether bei 3 W, womit Oberflächentemperaturen von ca. 220°C erzielt wurden. Unterhalb von 3 W wurde zudem keine Bildung von Kunststoffblasen beobachtet.

Bezogen auf den Strahlbereich im Fokus mit einem Radius von 1.3 mm (-10 dB, d.h. Abfall der Intensität auf zehn Prozent des Maximums) lässt sich eine zeitlich und räumlich gemittelte Intensität [21] von $I_{SATA} = \frac{P}{\pi r^2} \approx 600 \text{ mW/mm}^2$ für Schwefelkohlenstoff bzw. 500 mW/mm² für Diethylether ableiten, bei der Zündungen beobachtet wurden.

3.1.4 Diskussion der Ergebnisse und sicherheitstechnische Schlussfolgerungen

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass eine direkte Zündung durch das Ultraschallfeld nicht möglich ist, da wegen des Impedanzsprungs an der Phasengrenze flüssig-gasförmig 99% der Schallwelle reflektiert werden und intensiver Ultraschall zu einer Zerstäubung der Flüssigkeitsoberfläche führt. Bei brennbaren Flüssigkeiten überschreitet dadurch die Brennstoffkonzentration oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche die obere Explosionsgrenze, sodass keine Entzündung möglich ist.

Eine Zündung ist jedoch dann möglich, wenn sich ein Körper an der Flüssigkeitsoberfläche durch Absorption des Ultraschalls so stark erwärmt, dass sich eine explosionsfähige Atmosphäre oberhalb des Flüssigkeitsspiegels an dessen heißer Oberfläche entzündet.

Kann eine Schallintensität von 400 mW/mm² an der Flüssigkeitsoberfläche vermieden werden ist eine Zündung der explosionsfähigen Atmosphäre ausgeschlossen. Dieser Wert beinhaltet einen Sicherheitsabstand von 20% gegenüber der experimentell ermittelten Zündgrenze für Diethylether. Das Einhalten des Intensitätsgrenzwertes kann überprüft werden durch Hydrophonmessungen und Bestimmung der aus dem Schalldruck abgeleiteten Intensität $I(t) = p(t)^2/(\rho c)$, wobei ρ die Dichte und c die Schallgeschwindigkeit des Mediums bezeichnen (vgl. 62127-1 Ed.1.1 [21]).

Im Falle räumlich stark begrenzter Schallbündel (z. B. fokussierter Ultraschall im Frequenzbereich oberhalb von 500 kHz) bezieht sich der Grenzwert auf die räumlich über den Schallbündelquerschnitt (-12 dB-Bündelfläche) gemittelte Intensität I_{SATA} (vgl. IEC 62127-1 Ed.1.1 [21]). Alternativ zur Bestimmung von I_{SATA} über das Schalldruckprofil ist hier auch die Messung der akustischen Ausgangsleistung (vgl. IEC 61161 [22]) und Division durch die minimale -12 dB-Bündelfläche möglich.

Wird die Intensität von 400 mW/mm² überschritten, ist zusätzlich ein akustisch absorbierender Körper erforderlich, mit einer akustischen Impedanz ähnlich der Flüssigkeit (z.B. Kunststoffe, Bitumen, Bernstein, Teer), der sich im Ultraschallfeld so stark erwärmt, dass eine Zündung an seiner Oberfläche möglich ist. Dazu muss der Absorber im Schallfeld an der Flüssigkeitsoberfläche fixiert sein, in Ausbreitungsrichtung der Ultraschallwelle größer sein als eine halbe Wellenlänge und so temperaturbeständig sein, dass er die Zündtemperatur der explosionsfähigen Atmosphäre überschreiten kann. Absorbierende Stoffe können auch (aufschwimmende) Verunreinigungen an der Flüssigkeitsoberfläche sein.

3.2 Akustische Kavitation im kHz Bereich

3.2.1 Theoretische Betrachtungen

Da im kHz-Bereich von Ultraschall die Wellenlänge im Bereich von mehreren Zentimetern liegt (z.B. in Wasser ca. 7 cm bei 20 kHz) lässt sich bei diesen Frequenzen keine scharfe Fokussierung erzielen, die für eine lokale Erwärmung eines Zielkörpers genutzt werden könnte. Zudem müssten dessen Abmessungen für die Absorption dieser Schallwellen ebenfalls im einige Zentimeter betragen. Bei diesen Frequenzen entsteht starke akustische Kavitation, wobei in Gasblasen- und Dampfblasenkavitation zu unterscheiden ist. Bei der Gasblasenkavitation regt die Schallwelle mikroskopische Gasblasen in der Flüssigkeit zur Oszillation an, während bei der Dampfblasenkavitation Dampfblasen dadurch entstehen, dass der Druck in der Dekompressionsphase unter den Dampfdruck der Flüssigkeit sinkt. In letzterem Fall sind die Blasen mit dem Dampf aus der umgebenden Flüssigkeit gefüllt [23].

Unter dem Einfluss von hohen Schalldrücken erreichen die Gasblasen in der Unterdruckphase Größen von circa 100 μm und kollabieren in der anschließenden Überdruckphase innerhalb von wenigen Mikrosekunden auf Durchmesser von circa 1 μm . Durch die Geschwindigkeit der Implosion kommt es in der Blase zu einer adiabatischen Zustandsänderung, sodass in der Endphase des Kollapses im Inneren der Kavitationsblase Temperaturen von mehreren tausend Kelvin und extreme Drücke von mehreren hundert MPa entstehen. Außerdem konnte die Emission von Lichtblitzen einer Dauer von einigen 10 ns beobachtet werden. Gleichzeitig treten im Anschluss an den Kollaps Kühlungsraten von über 10^{12} K/s durch die umgebende Flüssigkeit auf [4, 29]. Kräfte zwischen oszillierenden Kavitationsblasen führen zudem dazu, dass sich die Blasen untereinander anziehen, sodass „Blasenwolken“ entstehen und sich die Blasen zu größeren Blasen vereinigen.

Vor dem Hintergrund dieser Bedingungen ist fraglich, ob es in diesen Kavitationsblasen zu Zündungen kommen kann, die sich auf benachbarte Blasen übertragen und an in eine explosionsfähige Atmosphäre an der Flüssigkeitsoberfläche durchschlagen können. Im „Worst-Case“ müssten die Kavitationsblasen selbst mit zündfähigem Gasgemisch gefüllt sein. Dazu ist es sinnvoll, Keime für die Kavitation zu erzeugen, durch Einleitung von einem Brennstoff-Luft Gemisch in der Flüssigkeit in unmittelbarer Nähe einerseits zum Entstehungsort von Kavitationsblasenwolken und der Flüssigkeitsoberfläche andererseits. Schematisch ist diese Situation in Abbildung 5 dargestellt. Zur Erzeugung des Ultraschalls dient dabei eine Sonotrode hoher Leistung, in deren unmittelbarer Nähe sich besonders konzentriert Kavitationsblasenfelder in Form von zusammenlaufenden Bändern, sog. Kavitationsstreamer, erzeugen lassen [24].

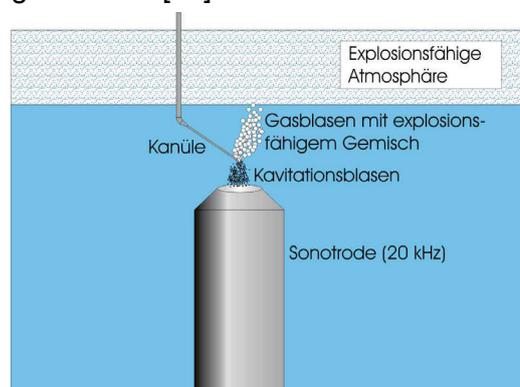


Abbildung 5: Worst-Case-Situation für die Zündwirksamkeit bei akustischer Kavitation

Wegen des im Vergleich zur Wellenlänge kleinen Durchmessers der Sonotrode ist das Feld der Sonotrode das eines „Punktstrahlers“, d.h. das Feld läuft direkt nach der Abstrahlung auseinander. Im Gegensatz zu Wandlern, deren Durchmesser groß sind im Vergleich zur

Wellenlänge, wie z.B. dem HIFU-Wandler, erfolgt bei der Sonotrode die Fokussierung der akustischen Leistung nicht durch Überlagerung der Schallwellen, die von einem konkaven Wandler abgestrahlt werden, sondern durch die kleine abstrahlende Fläche. Direkt vor der Sonotrode ergibt sich dann die Intensität aus der akustischen Leistung bezogen auf die Stirnfläche der Sonotrode. An dieser Stelle trifft auch die stärkste Kavitation auf [24] und ist somit für die Zündversuche besonders kritisch.

3.2.2 Experimentelle Untersuchungen

Die Umsetzung der in vorangegangenen Abschnitt beschriebenen „Worst-Case“ Bedingungen ist schematisch in Abbildung 6 gezeigt. Es handelte sich dabei um eine Modifikation des Aufbaus aus Abschnitt 3.1.2, der für die Zündversuche mit fokussiertem MHz-Ultraschall verwendet wurde.

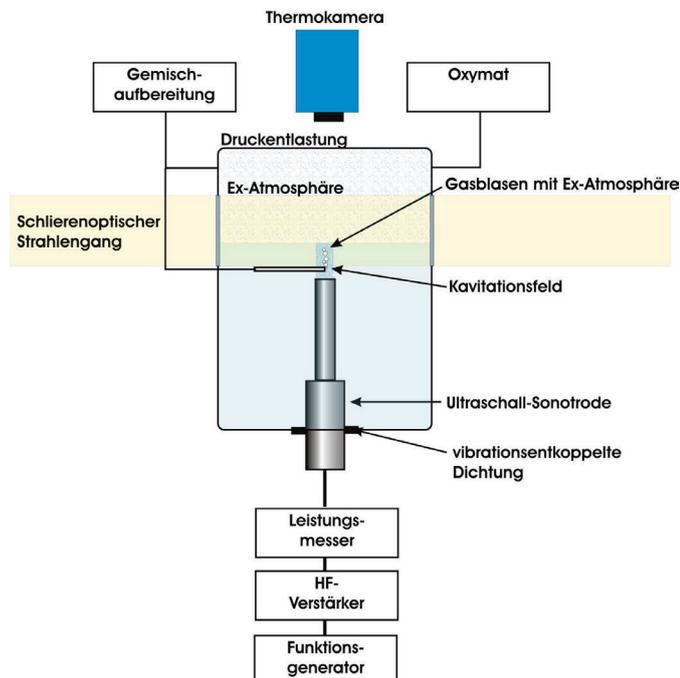


Abbildung 6: Umsetzung der Worst-Case-Situation bzgl. der Zündwirksamkeit von Kavitation in eine Versuchsanordnung

Anstelle des HIFU-Wandlers wurde eine 20 kHz Leistungs-Sonotrode aus der Prozessindustrie (Sonoprocessor DG 2000, Telsonic AG) verwendet, die von unten auf die Wasseroberfläche gerichtet war. Optional konnte wiederum ein Zielkörper an der Flüssigkeitsoberfläche positioniert und mit der Sonotrode beschallt werden. Im Vordergrund steht hier jedoch die Frage, ob die akustische Kavitation selbst eine Zündung hervorrufen kann.

Um dies experimentell zu untersuchen, wurde mittels eines Abzweiges der Zuleitung des Brennstoff-Luftgemisches Blasen in das vor der Sonotrode entstehende Kavitationsfeld eingeleitet. Ziel war es dabei einerseits, in der Flüssigkeit stets genügend „Keimblasen“ für direkt mit Brennstoff-Luft Gemisch gefüllte Kavitationsblasen zu erzeugen, sodass das Gemisch durch die adiabatische Kompression in der Implosionsphase entzündet werden könnte. Andererseits können Kavitationsblasen mit den größeren eingeleiteten Blasen in Kontakt treten und das Gasgemisch in diesen entzünden. Insbesondere von Interesse war, ob einer dieser Mechanismen zu einer explosionsartigen Reaktion führen könnte, die die explosionsfähige Atmosphäre an der Flüssigkeitsoberfläche entzündet.

Bei einer maximalen elektrischen Leistung von 650 W zu Ansteuerung der Sonotrode wurde mittels eines Hydrophons (Reson Typ TC4013-1) direkt vor der Sonotrode ein effektiver Schalldruck von 180 kPa gemessen.

Als Brennstoff wurden Schwefelkohlenstoff und Diethylether verwendet, da sie wiederum eine geringe Normzündtemperatur aufweisen (Temperaturklasse T6 bzw. T4) und Schwefelkohlenstoff zusätzlich eine geringe Normgrenzspaltweite (Explosionsgruppe IIC). Außerdem wurde Wasserstoff-Luft Gemisch verwendet, bei einer Konzentration von 22 %. Um die Bedingungen noch zu verschärfen wurde bei Beibehaltung der Wasserstoff-Luft Atmosphäre an der Flüssigkeitsoberfläche Wasserstoff-Sauerstoff im Verhältnis 2:1 in das Kavitationsfeld eingeleitet.

Zur Einleitung der Gasblasen in das Kavitationsfeld wurde zum einen eine Edelstahl-Fritte verwendet, mit einer Porenweite von 2 μm und eine Kanüle mit einem Innendurchmesser von 1 mm. Während mit der Fritte über eine Fläche eines Durchmessers von 25 mm verteilt viele Blasen gleichzeitig eingeleitet werden konnten, war es mit der Kanüle möglich zielgenau Brenngas-Luft Blasen in die unmittelbare Nähe der Kavitationsblasenanhäufungen einzuleiten. Zudem wurde die Wassersäule über der Sonotrodenstirnfläche variiert. Die Versuche erfolgten im Dauerschallmodus einerseits und im gepulsten Modus (Pulslänge 2 s) über eine Dauer von bis zu einer Stunde.

3.2.3 Ergebnisse

Bei keinem der verwendeten Gas-Luft Gemische kam es zu einer Zündung der explosionsfähigen Atmosphäre oberhalb des Wasserspiegels. Auch unterhalb der Flüssigkeitsoberfläche konnte keine zündähnliche Erscheinung beobachtet werden, selbst bei Einleitung von Wasserstoff-Sauerstoff-Gemisch.

Bei Einschalten der Sonotrode wurde ein dichter Kavitationsnebel sichtbar, der sich von der Sonotrode ausgehend erhebt. Dabei strömten die entstehenden Kavitationsblasen in Form einer spitz zulaufenden Kuppel Richtung Wasseroberfläche und schienen sich in der Spitze dieser Kuppel zu vereinigen.

Bei einer geringen Wassersäule über der Sonotrodenstirnfläche konnte eine deutliche Aufwölbung bis hin zur Zerstäubung der Flüssigkeitsoberfläche beobachtet werden. Eine Erhöhung der Wassersäule verringerte die Aufwölbung.

Bei Einsatz der Fritte zur Einleitung einer Vielzahl kleiner Blasen und Beobachtung dieser Blasen mittels der Hochgeschwindigkeitskamera war erkennbar, dass die eingeleiteten Blasen unter dem Einfluss der Kavitation in kleinere Blasen zertrümmert wurden. Entsprechend der Untersuchungen von Mitropetros [25] lassen sich kleinere Blasen jedoch schlechter zünden als größere, sodass dieser Effekt die Wahrscheinlichkeit einer Zündung der eingeleiteten Blasen verringert.

Unter Verwendung der Kanüle zur Einleitung von Brenngas-Luft Gemisch konnten die Blasen direkt unterhalb der Spitze der kuppelförmigen Kavitationsfigur sowie direkt vor der Stirnfläche der Sonotrode eingeleitet werden. Auf diese Weise kamen sie in Kontakt mit einer Vielzahl von Kavitationsblasen. Die mit der Kanüle eingeleiteten Blasen hatten einen Durchmesser von ca. 3 mm – 5 mm. Der Effekt der Zertrümmerung der eingeleiteten Blasen durch die Kavitationsblasen war in dieser Konstellation weniger stark ausgeprägt, sodass sie gegenüber der Fritte als die kritischere gewertet wurde.

3.2.4 Diskussion und sicherheitstechnische Schlussfolgerungen

In den durchgeführten Untersuchungen wurde ein Versuchsaufbau verwendet, in dem die Zündung explosionsfähiger Atmosphäre provoziert wurde. Dies geschah einerseits durch Verwendung einer Sonotrode mit im Vergleich zu Ultraschallreinigungsbädern hoher Leistung (650 W), die in unmittelbarer Nähe der abstrahlenden Fläche (Durchmesser 20 mm) eine Intensität $I = P/\pi r^2$ der Größenordnung von 1000 mW/mm^2 erreicht und so den aktuell gültigen Grenzwert (1 mW/mm^2) um 3 Größenordnungen übersteigt. Als explosionsfähige Atmosphären wurden Schwefelkohlenstoff-Luft, Diethylether-Luft und Wasserstoff-Luft in

zündwilligsten Konzentrationen verwendet. Diese Brennstoffe stellen entsprechend ihrer Einteilung in Explosionsgruppen und Temperaturklassen Extremfälle der explosionsfähigen Atmosphäre dar [19]. Um diese Gemische möglichst direkt der Kavitationswirkung auszusetzen, wurden sie einerseits großflächig und andererseits gezielt als Blasen in das Kavitationsfeld vor der Sonotrode eingeleitet. Dabei wurden Blasengrößen von 1 mm bis 5 mm verwendet, da entsprechend der Untersuchungen nach [25] sich diese Größe für Blasenexplosionen in Flüssigkeiten als günstig erwiesen hat. Um die Bedingungen weiter zu verschärfen, wurde zusätzlich Wasserstoff – Sauerstoff im Verhältnis 2:1 eingeleitet.

Trotz der extremen Bedingungen konnte auch bei Beschallungsdauern von bis zu 1 h keine Zündung an der Flüssigkeitsoberfläche oder in den eingeleiteten Blasen beobachtet werden. Die gelbliche Verfärbung der Flüssigkeit in den Versuchen bei Schwefelkohlenstoff kann auf den Ausfall von Schwefel zurückgeführt werden. Entsprechend scheint es in der Flüssigkeit unter Einfluss der Kavitation zu einer verbrennungsähnlichen Reaktion gekommen sein, ohne dass es zu einer Zündung gekommen ist, die an die Flüssigkeitsoberfläche durchgeschlagen ist. Eine lokale Zündung einzelner Blasen unter der Wasseroberfläche war für keines der Gemische erkennbar. Insgesamt stehen die Ergebnisse im Einklang mit Untersuchungen zu durch Kavitation gezündeten „Blasenverbrennungen“ („cavitation ignition bubble combustion“ [26].

Die Ergebnisse der Untersuchungen legen den Schluss nahe, dass es zwar innerhalb der Kavitationsblasen zu zündähnlichen Reaktionen kommt, die kurze Dauer der Blasenimplosion von ca. 1 μ s, die geringen Blasendurchmesser um 1 μ m und -damit verbunden- die starke Kühlung durch die umgebende flüssige Phase aber dazu führen, dass die Reaktion erlischt. Die Kühlung wird zusätzlich zum Wärmeaustausch mit der Umgebung durch das „Zurückfedern“ der Kavitationsblase direkt nach dem Kollaps verstärkt, sodass in der Literatur Kühlungsraten der Größenordnung 10^{12} K/s angegeben werden [27]. Zudem ist bei der Dauer der Blasenimplosion zu berücksichtigen, dass die extremen Temperaturen und Drücke erst in der letzten Phase des Kollaps auftreten, die entsprechend nur einige 10 ns bis 100 ns andauert, was auch der Lichtemissionsdauer der Sonolumineszenz entspricht [27].

Akustische Kavitation stellt entsprechend der durchgeführten Untersuchungen keinen wirksamen Zündmechanismus gegenüber explosionsfähigen Atmosphären an der Flüssigkeitsoberfläche dar. In Flüssigkeiten ist entsprechend der Untersuchungen aus Abschnitt 3.1 die Absorption durch ultraschallabsorbierende Körper an der Flüssigkeitsoberfläche mit Kontakt zu explosionsfähiger Atmosphäre der kritische Fall.

4 Zusammenfassung

Die Ergebnisse des Forschungsprojektes zeigen, dass Ultraschall durch Anwesenheit eines schallabsorbierenden Körpers, der die akustische Energie in Wärme umwandelt, als Zündquelle wirksam werden kann. Gleichzeitig erlauben die Ergebnisse, den bestehenden Grenzwert von 1 mW/mm² erheblich zu erhöhen. Dabei empfiehlt sich eine Unterscheidung zwischen Flüssigkeit und gasförmiger Atmosphäre als Ausbreitungsmedium des Ultraschalls. Für direkt in gasförmige Atmosphären eingekoppelten Ultraschall wird ein Grenzwert als Schalldruckpegel von 170 dB (re. 20 μ Pa), für Ultraschall in Flüssigkeiten als räumlich und zeitlich gemittelte Intensität von 400 mW/mm² empfohlen.

Zudem konnten für beide Ausbreitungsmedien Maßnahmen zur Vorbeugung gegen Zündungen durch Ultraschall aufgezeigt werden. Für Ultraschallfelder, die oben genannte Grenzwerte überschreiten, betreffen diese in beiden Fällen die Vermeidung von Körpern im Schallfeld, die an die akustische Impedanz des Ausbreitungsmediums angepasst sind und hohe akustische Absorptionskoeffizienten aufweisen.

In den meisten industriellen Ultraschallanwendungen der Reinigungstechnik, der Messtechnik und der Prozesstechnik ist das gleichzeitige Auftreten der Bedingungen, die zu

einer Zündung führen können, unwahrscheinlich oder kann mit geringem Aufwand vermieden werden. Dies spiegelt sich auch in der Tatsache wider, dass bis dato keine Explosionsunfälle durch Ultraschall aufgetreten sind.

Im Hinblick auf zukünftige Entwicklungen wie den Einsatz von brennbaren Reinigungsflüssigkeiten oder den Einsatz von Leistungs-Ultraschall zur Staub- bzw. Partikelabscheidung in Luft, kann durch die beschriebenen Maßnahmen der sichere Betrieb gewährleistet werden.

In diesem Forschungsprojekt konnte erstmals experimentell nachgewiesen werden, dass Ultraschall sowohl in explosionsfähigen Atmosphären von Stäuben als auch von Dämpfen brennbarer Flüssigkeiten zündwirksam werden kann. Eine Zündung erfordert sehr hohe Leistungen der Ultraschallquelle und spezielle Randbedingungen. Ultraschallfelder können im Bereich hoher Schalldrücke bzw. Intensitäten durch Erwärmung von absorbierenden Festkörpern, die an die akustische Impedanz des Ausbreitungsmediums angepasst sind und hohe akustische Absorptionskoeffizienten aufweisen, mittelbar zu zündwirksamen heißen Oberflächen führen. Kavitation ist dagegen als Zündquelle unwirksam.

Die Ergebnisse erlauben es, für den Einsatz in Gasen und in Flüssigkeiten differenzierte Grenzwerte vorzuschlagen, die einer Anhebung des bestehenden Grenzwertes von 1 mW/mm² um mehr als zwei Größenordnungen entsprechen. Für direkt in gasförmige Atmosphären eingekoppelten Ultraschall wird ein Grenzwert als Schalldruckpegel von 170 dB (re. 20 µPa), für Ultraschall in Flüssigkeiten als räumlich und zeitlich gemittelte Intensität von 400 mW/mm² vorgeschlagen. Damit sind alle heute bekannten Ultraschallanwendungen in explosionsgefährdeten Bereichen entweder unkritisch oder durch einfache Maßnahmen, die oft aus technischen Gründen ohnehin gegeben sind, sicher zu gestalten. Dies spiegelt sich auch in der Tatsache wider, dass bis dato keine Explosionsunfälle durch Ultraschall aufgetreten sind.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, der Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie, der Berufsgenossenschaft Holz und Metall, der Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse, der Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin mbH und den Unternehmen BANDELIN electronic GmbH & Co. KG, Elma Hans Schmidbauer GmbH & Co. KG, Endress+Hauser Messtechnik GmbH+Co. KG, Georg Render GmbH, TELSONIC AG und Weber Ultrasonics GmbH für ihre Unterstützung!

Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN 1127-1:2011; Explosionsfähige Atmosphären – Explosionsschutz – Teil 1: Grundlagen und Methodik
- [2] Technische Regeln für Betriebssicherheit, TRBS 2152 Teil 3; Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre – Vermeidung der Entzündung von gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre; GMBI Nr. 77, 2009, S.1583
- [3] Simon, L.H., Wilkens, V., Fedtke, T., Beyer, M.; Ignitions of dust-atmospheres by ultrasonic waves; International Symposium on Hazard, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions; Kraukau, 2012
- [4] Kuttruff, H.; Physik und Technik des Ultraschalls, Hirzel Verlag, Stuttgart, 1988
- [5] Gallego-Juárez, J. A., Rodríguez, G., Acosta, V., Riera, E.; Power ultrasonic transducers with extensive radiators for industrial processing; Ultrasonic Sonochemistry, vol. 17 (2010), pp. 953–964
- [6] Settnes, M., Bruus, H.; On the forces acting on a small particle in an acoustical field in a viscous fluid; Physical Review E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics, vol. 85 (2012), pp. 016327-1 – 016327-12

- [7] Hemsel, T., Hennig, C., Kauczor, C., Littmann, W.; Powder coating fabrication by ultrasonic standing wave atomizer. HNI Verlagsschriftenreihe, vol. 180 (2005), pp. 183-186
- [8] Ensminger, D.; Ultrasonics - Fundamentals, Technology, Applications. Dekker, Inc., 1988
- [9] Suslick, K.S.; The chemical effects of ultrasound; Scientific American, 2 (1989), pp. 80-86
- [10] Simon, L.H., Wilkens, V., Beyer, M.; Untersuchungen zur Zündwirksamkeit von Ultraschall in explosionsfähigen Atmosphären; Magdeburger Brand- und Explosionsschutztag, Magdeburg, 2013
- [11] Dukhin A.S., Goetz P.J.; Ultrasound for Characterizing Colloids – Particle Sizing, Zeta Potential, Rheology. Elsevier, 2002
- [12] Nyborg, W.L.; Heat generation by ultrasound in a relaxing medium; Journal of the Acoustic Society of America, vol. 70 (1981); pp. 310 – 312
- [13] Simon, L.H., Wilkens, V., Fedtke, T., Beyer, M.; Ignitions of dust-atmospheres by ultrasonic waves; International Symposium on Hazard, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions; Kraukau, 2012
- [14] Ejakov, S.G., Phillips, S., Dain, Y.; Lueptow, R.M., Visser, J.G.; Acoustic attenuation in gas mixtures with nitrogen: Experimental data and calculations, Journal of the Acoustic Society of America, vol. 113 (2003), pp. 1871 – 1879, doi: 10.1121/1.1559177
- [15] Allegra, J.R., Hawley, S.A.; Attenuation of sound in suspensions and emulsions: Theory and experiment; Journal of the Acoustic Society of America, vol. 51 (1972), pp. 1545 – 1564
- [16] Epstein, P.S., Carhart, P.P.; The acoustic attenuation in suspensions and emulsions. I. Water fog in air; Journal of the Acoustic Society of America, vol. 25 (1953), pp. 553 – 565
- [17] Mechel, F.P.; Schallabsorber – Band II: Innere Schallfelder, Strukturen; Hirzelverlag, Stuttgart, 1995
- [18] Welzel, M.M.; Entzündung von explosionsfähigen Dampf/Luft- und Gas/Luft-Gemischen durch kontinuierliche optische Strahlung; Braunschweig: PTB-Bericht PTB-W-67, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, 1996
- [19] Brandes E, Möller W.; Safety Characteristic Data, Volume 1: Flammable Liquids and Gases, Wirtschaftsverlag NW, 2008
- [20] Deutsch, V. Platte, M. Vogt, M.; Ultraschallprüfung – Grundlagen und industrielle Anwendungen; Springer Verlag, Berlin, 1997
- [21] IEC 62127-1 Ed.1.1; Ultrasonics – Hydrophones- Part 1: Measurement and characterization of medical ultrasonic fields up to 40 MHz
- [22] IEC 60079-1-1; Electrical apparatus for explosive gas atmospheres – Part 1-1: Flameproof enclosures “d” – Method of test for ascertainment of maximum experimental safe gap
- [23] Kornfeld, M; On the destructive action of cavitation; Journal of Applied Physics, vol. 15, (1944), pp. 495-506, doi: 10.1063/1.1707461
- [24] Mettin, R. Bubble structures in acoustic cavitation; in: A. A. Doinikov (ed.); Bubble and Particle Dynamics in Acoustic Fields: Modern Trends and Applications, Research Signpost, Kerala (India) 2005, pp. 1-36
- [25] Mitropetros, K.; Shock induced bubble explosions in liquid cyclohexane; BAM-Dissertationsreihe, Band 11; Berlin, 2005
- [26] Nguyen, Q.V., Jacquim, D.A.; A study of cavitation-ignition bubble combustion; NASA Glenn Research Center, Tech. Rep., 2005
- [27] Suslick, K.S., Flannigan, D.J.; Inside a collapsing bubble: Sonoluminescence and the conditions during cavitation; Annual Review of Physical Chemistry, vol. 59 (2008), pp. 659 –683, doi: 11.1146/annurev.physchem.59.032607.093739

Terms of Use

Any party may pass on this Work by electronic means and make it available for download under the terms and conditions of the Digital Peer Publishing License (DPPL) Version 3.0. The text of the license may be accessed and retrieved via Internet at <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:0009-dppl-v3-en8>.

Beyond the conditions of the DPPL, the data which is contained in this catalog May only be used by any party for signal processing if the data is inserted into the source code of the program together with a reference to the catalog and if the program documentation (if available) also contains a reference to this catalog.

Exclusion of Liability

Deviating from paragraphs 12 and 13 of the DPPL Version 3.0, a comprehensive exclusion of liability applies. This states: This catalog is made available without any special or implied guarantee, which – among others – includes the implicit guarantee of the use of the catalog for a certain purpose. Under no circumstances is PTB responsible for any direct or indirect damage, independent of how it arose, through the use of the catalog. This also applies to damage due to errors of the catalog, which were already known at the occurrence of the damage.