

Michael Beyer, Volker Wilkens, Lars Hendrik Simon

Zündwirksamkeit von Ultraschall beim Einsatz in explosionsfähigen Dampf- und Gas-Luft- Atmosphären

Abschlussbericht zum DGUV Forschungsprojekt Nr. 617-0-FP303 und den
PTB-Forschungsvorhaben FV-37010 und FV-37011

Physikalisch-Technische Bundesanstalt

Explosionsschutz

PTB-Ex-5

Braunschweig, Dezember 2014

Michael Beyer, Volker Wilkens, Lars Hendrik Simon

Zündwirksamkeit von Ultraschall beim Einsatz in explosionsfähigen Dampf- und Gas-Luft-Atmosphären

Abschlussbericht zum DGUV Forschungsprojekt Nr. 617-0-FP303
und den PTB-Forschungsvorhaben FV-37010 und FV-37011

Zündwirksamkeit von Ultraschall beim Einsatz in explosionsfähigen Dampf- und Gas-Luft Atmosphären

Abschlussbericht
zum
DGUV Forschungsprojekt
Nr. 617-0-FP303
und den
PTB-Forschungsvorhaben
FV-37010 und FV-37011

Laufzeit: 01.12.2009 – 31.03.2013
Projektleiter: Dr.-Ing. Michael Beyer
Projektbearbeiter: Dipl. Wirtsch.-Ing. Lars Hendrik Simon

Kooperationspartner:

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV)
Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse
Berufsgenossenschaft Holz und Metall
Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie
Forschungsgesellschaft für angewandte Systemsicherheit und Arbeitsmedizin
mbH
BANDELIN electronic GmbH & Co. KG
Elma Hans Schmidbauer GmbH & Co. KG
Georg Render GmbH
Endress+Hauser Messtechnik GmbH+Co. KG
TELSONIC AG
Weber Ultrasonics GmbH

Vorhabensziele:

Ziel des Vorhabens ist es, eine ausreichende Datenbasis für eine sicherheitstechnische Neubewertung der potenziellen Zündquelle Ultraschall zu erreichen. Dazu sind im Einzelnen folgende Fragestellungen zu beantworten:

1. Unter welchen Bedingungen lässt sich mit Ultraschall eine explosionsfähige Atmosphäre zünden?
2. Welche Zündgefahren treten unter welchen Randbedingungen auf?
3. Welche Bewertungskriterien und Grenzbedingungen gelten?

Dabei wird unterschieden in Anwendungen, bei denen der Ultraschall in eine gasförmige Atmosphäre eingekoppelt wird und Anwendungen, bei denen die Einkopplung in einer flüssigen Phase (Ultraschallbad) erfolgt.

Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung	3
2	Forschungszweck	4
3	Methodisches Vorgehen und Projektplan	5
4	Ergebnisse des Forschungsprojektes	7
4.1	Projektabschnitt 1: Vorbereitende Arbeiten	7
4.1.1	Literaturrecherche und Verfahrensanalyse	7
4.1.2	Recherche von Unfallszenarien	7
4.1.3	Entwicklung von Ultraschallmesstechnik	8
4.2	Projektabschnitt 2: Theoretische Betrachtungen	8
4.2.1	Ultraschall in gasförmigen Medien und Stäuben	8
4.2.2	Ultraschall an Flüssigkeitsoberflächen	9
4.2.3	Akustische Kavitation	11
4.3	Projektabschnitt 3: Zündwirksamkeit von Ultraschall gegenüber Partikeln und Staub-Luft Gemischen	11
4.3.1	Versuchsanordnung und Versuchsdurchführung	11
4.3.2	Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen	14
4.4	Projektabschnitt 4: Zündwirksamkeit von Ultraschall an der Flüssigkeitsoberfläche	14
4.4.1	Versuchsanordnung und Versuchsdurchführung	14
4.4.2	Ergebnisse der Untersuchungen	17
4.5	Projektabschnitt 5: Zündwirksamkeit von Kavitation in nicht-entgasten Flüssigkeiten	18
4.5.1	Versuchsanordnung und Versuchsdurchführung	18
4.5.2	Ergebnisse der Untersuchungen	19
4.6	Projektabschnitt 6: Sicherheitstechnische Schlussfolgerungen	21
4.6.1	Generell	21
4.6.2	Zündwirksamkeit von Ultraschall gegenüber Partikeln und Staub-Luft Gemischen	22
4.6.3	Zündwirksamkeit von Ultraschall an der Flüssigkeitsoberfläche	22
4.6.4	Zündwirksamkeit von Ultraschall bei akustischer Kavitation	24
5	Veröffentlichungen aus dem Gesamtvorhaben	25
6	Bewertung der Ergebnisse	26
7	Umsetzungs- und Verwertungsplan	27

8 Anhang	27
Liste kontaktierter externer Experten	27
Wirkung und Anwendungen von Ultraschall	28
Verwendete Stäube	30
Literatur	30

Abbildungsverzeichnis

1	Worst-Case Situation für gasförmige Medien	9
2	Worst-Case Situation für Flüssigkeitsoberflächen	10
3	Worst-Case Situation für Flüssigkeitsoberflächen	12
4	Versuchsanordnung für Zündversuche in Staub-Luft Gemischen	13
5	Versuchsanordnung für Zündversuche an der Flüssigkeitsoberfläche mit fokussiertem Ultraschall [1]	15
6	Versuchsanordnung zu Kavitation	19
7	Fallunterscheidung bezüglich der Schallquellenabmessung gegenüber der Wellenlänge	23
8	Additive Überlagerung von Quellen	24
9	Fehlende Überlagerung im Fernfeld	24

Tabellenverzeichnis

1	Wirkungen von Ultraschall	28
2	Anwendungen von Ultraschall	29
3	Verwendete Stäube	30

1 Problemstellung

In der EN 1127-1:2011 [2] und den TRBS 2152 Teil 3 [3] wird Ultraschall als eine von 13 Zündquellen genannt und ein Grenzwert von 1 mW/mm^2 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 zur 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, 6], zur Levitation [7–9] und zur Herstellung von Lacken verwenden [10]. 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 akustische Kavitation zum Homogenisieren, Emulgieren und zum Aufschluss von Zellen verwendet werden. Außerdem beschleunigt die Kavitation den Ablauf chemischer Reaktionen [5, 11, 12]. In vielen der genannten Bereichen 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 [13].

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, um eine sicherheitstechnische Neubewertung zu 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) [1].

2 Forschungszweck

Ziel des Forschungsprojektes war es zu prüfen, unter welchen Bedingungen Ultraschall zündwirksam werden kann. Anhand von theoretischen und experimentellen Untersuchungen sollte dabei eine Datenbasis geschaffen werden, die Ultraschall als Zündquelle charakterisiert. Im Vordergrund stehen dabei folgende Fragestellungen:

1. Unter welchen Bedingungen lässt sich mit Ultraschall eine explosions-

fähige Atmosphäre zünden?

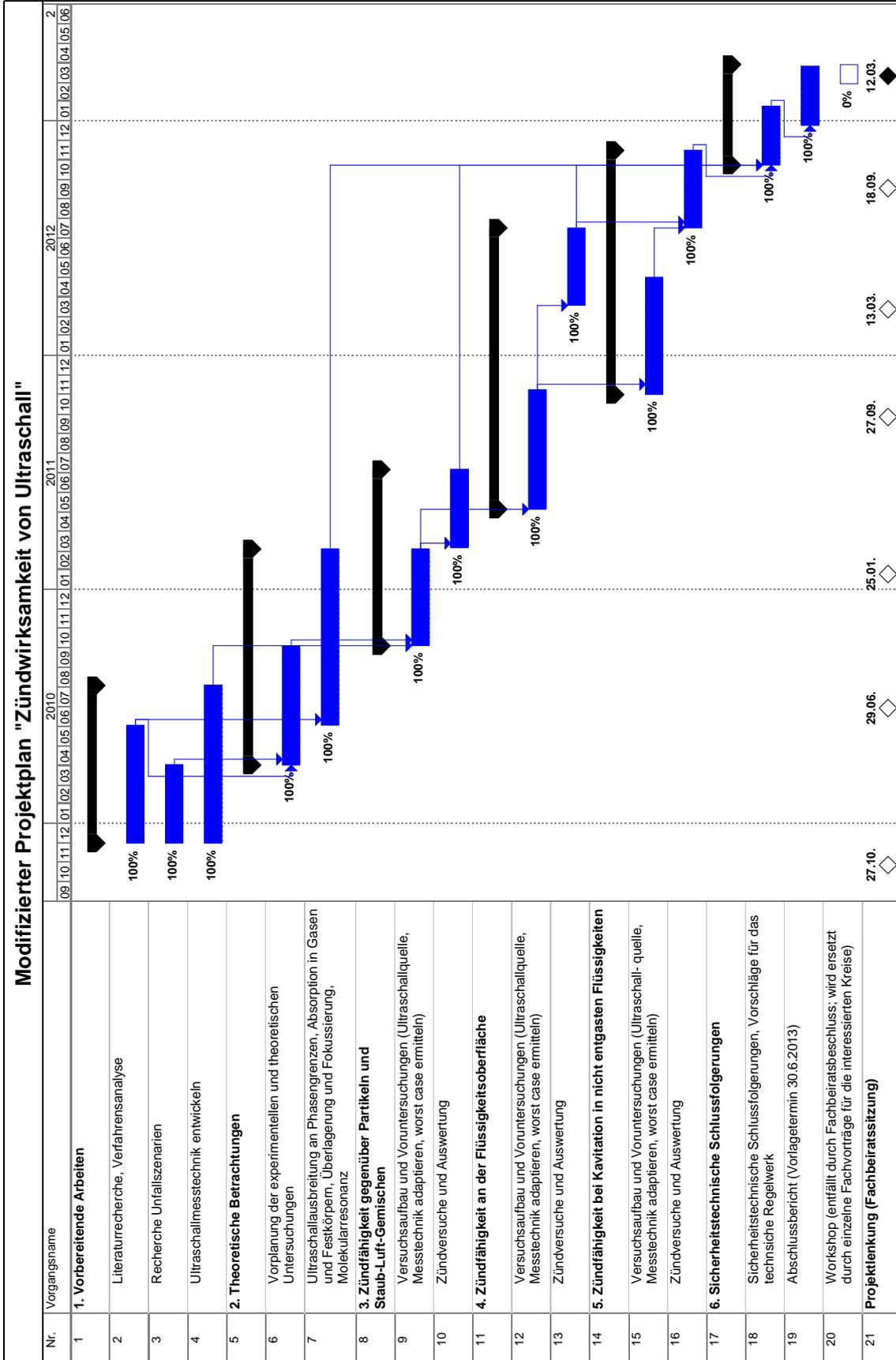
2. Welche Zündgefahren treten unter welchen Randbedingungen auf?
3. Welche Bewertungskriterien und Grenzbedingungen gelten?

3 Methodisches Vorgehen und Projektplan

Das Forschungsprojekt wurde in sechs Projektabschnitte untergliedert, die sukzessive abgearbeitet werden konnten und im Projektplan dargestellt sind. Projektbegleitend tagte ein Fachbeirat, der sich aus den Projektpartnern zusammensetzte und halbjährlich die erzielten Fortschritte und über das weitere Vorgehen diskutierte. Aus dem Projektplan geht das methodische Vorgehen in der Projektbearbeitung hervor. Im ersten Projektabschnitt wurden vorbereitende Arbeiten durchgeführt, die insbesondere das Recherchieren und Sammeln von Informationen zu Ultraschall beim Einsatz in explosionsfähigen Atmosphären und damit verbundenen Explosionsunfällen betrafen, gleichzeitig aber auch die Möglichkeit, Ultraschall in unterschiedlichen Medien zu messen. Aufbauend auf den Erkenntnissen und Quellen dieser Recherche wurden im zweiten Projektabschnitt theoretische Betrachtungen hinsichtlich der Ausbreitung von Ultraschall in unterschiedlichen Medien angestellt, woraus drei Worst-Case Szenarien abgeleitet werden konnten. Darauf aufbauend wurden experimentelle Untersuchungen geplant. Aus dem Projektplan geht das methodische Vorgehen in der Projektbearbeitung hervor. Im ersten Projektabschnitt wurden vorbereitende Arbeiten durchgeführt, die insbesondere das Recherchieren und Sammeln von Informationen zu Ultraschall beim Einsatz in explosionsfähigen Atmosphären und damit verbundenen Explosionsunfällen betrafen, gleichzeitig aber auch die Ultraschallmesstechnik in unterschiedlichen Medien.

Aufbauend auf den Erkenntnissen dieser Recherche wurden im zweiten Projektabschnitt theoretische Betrachtungen hinsichtlich der Ausbreitung von Ultraschall in unterschiedlichen Medien angestellt, woraus drei Worst-Case Szenarien abgeleitet werden konnten. Darauf aufbauend wurden experimentelle Untersuchungen geplant.

In nächsten Konkretisierungsschritt wurden in den Projektabschnitten 3 bis 5 experimentelle Untersuchungen für drei Worst-Case Situationen durchgeführt. Dazu wurde jeweils ein Versuchsaufbau erstellt, der jeweils eine Worst-Case Situation umsetzte. In Vorversuchen wurden zudem die Worst-Case Bedingungen hinsichtlich der Positionierung und der verwendeten Stoffe weiter charakterisiert. Durch Zündversuche wurde weiterhin die Zündwirksamkeit von Ultraschall in der jeweiligen Situation untersucht. Schließlich wurden die Ergebnisse zur Ableitung sicherheitstechnischer Schlussfolgerungen im letzten Projektabschnitt genutzt.



4 Ergebnisse des Forschungsprojektes

4.1 Projektabschnitt 1: Vorbereitende Arbeiten

4.1.1 Literaturrecherche und Verfahrensanalyse

Zu Beginn des Forschungsvorhabens wurde eine Literaturrecherche durchgeführt. Neben eigener Recherchen an den Bibliotheken der PTB und der TU Braunschweig zu Grundlagenliteratur des Ultraschall und des Explosionsschutz, wurde eine Literaturrecherche durch die Bibliothek der PTB unternommen. Dabei wurden die Datenbanken FIZ Technik, ASSIST und INSPEC nach Schlagwörtern durchsucht. Die direkte Suche nach Zündmechanismen durch Ultraschall ergab dabei keinen Treffer. Deswegen wurde nach Schlagwörtern gesucht, die mit möglichen Zündmechanismen in Zusammenhang stehen könnten. Im Verlauf des Forschungsvorhabens wurde begleitend weiter die Literatur beobachtet [13].

Ultraschallanwendungen können zunächst grob in sensorische und aktorische Anwendungen unterteilt werden [14]: Sensorische Ultraschalleistung arbeiten meist bei geringer Intensität, etwa bei der medizinischen Diagnostik oder der zerstörungsfreien Prüfung. Das durchstrahlte Medium darf dabei nicht bzw. möglichst gering in seinen Eigenschaften verändert werden [11]. Wegen der geringen Intensitäten sind solche sensorischen Anwendungen unkritisch. Laufzeitverfahren in Fluiden wie der Entfernungsmessung oder Füllstandsmessverfahren sind jedoch Beispiele für sensorische Ultraschallverfahren, in denen auch hohe Leistungen verwendet werden müssen, um größere Distanzen zu überbrücken. Die höchsten Ultraschalleistungen werden in aktorischen Anwendungen erreicht. Darunter sollen hier alle Anwendungen verstanden werden, in denen die Wirkung des Ultraschall das Medium verändert [11]. Wirkungen von Ultraschall, die in technischen Anwendungen genutzt werden, sind in Tabelle 1 im Anhang aufgelistet. Tabelle 2 listet ohne Anspruch auf Vollständigkeit Ultraschallanwendungen hoher Schallintensitäten, die in der Industrie verbreitet sind. Dabei gibt es Bereiche, in denen Ultraschall und explosionsfähige Atmosphäre zusammenkommen. Es ist jeweils aufgelistet, in welches Medium der Ultraschall direkt eingekoppelt wird, zudem der Frequenzbereich.

4.1.2 Recherche von Unfallszenarien

Überlappend mit der Literaturrecherche wurde zudem geprüft, ob es in der Vergangenheit zu Explosionsunfällen mit Ultraschall gekommen ist. Befragt wurden dabei die Gewerbeaufsicht, Sachversicherer, die Kooperationspartner (insbesondere die DGUV), die GEFAU (Gesellschaft für angewandte Ultraschallforschung e.V.) und Experten im Ausland. Im Ergebnis sind keine solchen Unfälle zu verzeichnen [13].

4.1.3 Entwicklung von Ultraschallmesstechnik

Bei der Messung von Ultraschall sind im Bezug auf das Forschungsvorhaben drei unterschiedliche Messbedingungen zu unterscheiden. Diese betreffen Messungen von Ultraschall in Luft, in Flüssigkeiten im Frequenzbereich von 1 MHz und in nichtentgasteten Flüssigkeiten im kHz-Bereich. Für die Messungen in Luft wird wegen der hohen Schallpegel über 160 dB, die handelsübliche Mikrofone beschädigen könnten, ein piezoelektrischer Druckaufnehmer der Firma PCB Piezotronics verwendet. Dieser ist gegenüber weit höheren Drücken robust. Für die Messungen wird das Modell 112 A22 verwendet. Sein Durchmesser beträgt 5 mm. Er lässt sich mit Hilfe eines Schallkalibrators (Brüel&Kjaer Typ 4231) kalibrieren. Das Messsignal des PCB Drucksensor wird in einen breitbandigen Messverstärker (Brüel&Kjær, Modell 2610) geleitet und dort als RMS Wert in dB angezeigt. Zudem lässt sich das Schallfeld in transparenten Medien auch mittels einer Schlierenoptik qualitativ darstellen.

Leistungsmessungen in Flüssigkeiten wurden mittels einer von der PTB- Arbeitsgruppe Ultraschall kalibrierten Strahlungskraftwaage durchgeführt. Für Messungen des Profils eines fokussierten Ultraschallstrahles wurden die Messungen mit kalibrierten Membranhydrophonen bei geringen Leistungen normiert durchgeführt. Für die Messung des Schalldrucks in im kHz-Bereich wurde ein Hydrophon der Firma Reson (Typ TC4013) verwendet.

4.2 Projektabschnitt 2: Theoretische Betrachtungen

4.2.1 Ultraschall in gasförmigen Medien und Stäuben

Aufbauend auf der Literaturrecherche und der Analyse von Anwendungsgebieten für Ultraschall wurden theoretische Überlegungen mit dem Ziel angestellt, Worst-Case Bedingungen aufzudecken, die eine Zündung durch Ultraschall provozieren könnten. Dabei wurde grundsätzlich unterschieden in Situationen, bei denen die Schallwelle in Luft und in Flüssigkeit eingekoppelt wird.

Im ersten Fall breitet sich der Ultraschall direkt in der explosionsfähigen Atmosphäre aus, wenn das Gasgemisch aus einem Brennstoff (brennbares Gas, Staub) und Luft besteht und könnte entsprechend direkt zu ihrer Entzündung führen. Allerdings liegt die Dämpfung pro Wellenlänge von Schallwellen in Gasen und Aerosolen im Bereich weniger Prozent [15–22]. Das Impedanzverhältnis von Sender zum gasförmigen Medium liegt in der Größenordnung von $Z_{\text{Sender}}/Z_{\text{Luft}} \approx 10^4$, (z.B. für eine Titan-Sonotrode als Sender), sodass der Erzielung hoher Schallpegel in Gasen technische Grenzen gesetzt sind [23]. Zusammen mit der geringen Dämpfung folgt, dass eine direkte Zündung ausgeschlossen werden kann. Ist dagegen im Schallfeld ein Körper mit hohem Absorptionskoeffizienten vorhanden, dessen Impedanz ähnlich der des Gasgemisches ist, könnte dieser sich erwärmen, so dass es zu einer Zündung

an der heißen Oberfläche kommt. Entsprechend Nyborg [24] verschärft sich die Situation in resonanten Ultraschallstehwellenfeldern, da sich in dessen Druckbäuchen Erwärmungsraten ergeben, die die in fortschreitenden Wellen übertreffen. Als Worst-Case Situation für die Untersuchung von gasförmigen Medien wird entsprechend [25] betrachtet, dass sich ein den Ultraschall absorbierender Körper im Schalldruckbauch eines resonanten Ultraschallstehwellenfeldes befindet, der die akustische Energie in Wärme transformiert und eine ihn umgebende explosionsfähige Atmosphäre an seiner Oberfläche entzündet (vgl. Abbildung 1) [13].

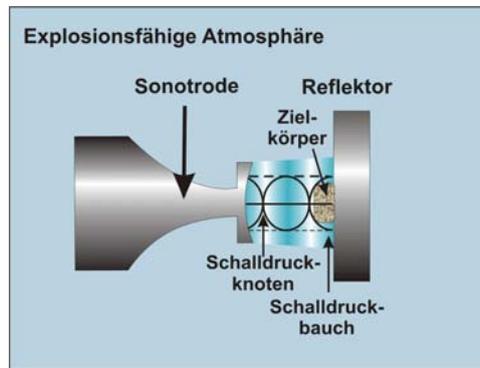


Abbildung 1: Worst-Case Situation für die Einkopplung von Ultraschall in gasförmige Medien [13]

4.2.2 Ultraschall an Flüssigkeitsoberflächen

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, so dass 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 bei Ultraschallreinigungsbädern mit Lösemitteln auftreten, müsste die Schallwelle die Phasengrenze flüssig-gasförmig überwinden, an der sie jedoch zu 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. Durch einen an der Flüssigkeitsoberfläche feststehenden 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 [26]. 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 [4]. Eine weitere besondere Eigenschaft von Kunststoffen ist ihre geringe Wärmeleitfähigkeit. Da der Ultraschall 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. Dies unterstützt die Ausbildung eines heißen Flecks an der Zielkörperoberseite. Viele Kunststoffe besitzen Schmelztemperaturen im Bereich von 150°C , so dass sich keine für eine Zündung aussichtsreiche Temperaturen erzielen lassen. Allerdings gibt es spezielle Kunststoffe mit Schmelztemperaturen bis 350°C . Andere Medien mit schlechter akustischer Anpassung an die Flüssigkeit (z. B. Metalle, Glas, Keramik [26]) weisen eine zu starke Reflexion 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.

Die Absorption des Schalldrucks erfolgt gemäß $p(x, t) = p_0(x, t) \cdot e^{-\alpha \cdot x}$, worin $p_0(x, t)$ die verlustfreie Schalldruckausbreitung beschreibt. Für eine signifikante Absorption ist zusätzlich zu einem hohen Absorptionskoeffizienten α notwendig, dass der Zielkörper in Ausbreitungsrichtung x die Größenordnung einer Wellenlänge hat. Aus diesen Überlegungen ergibt sich die Worst-Case Situation für Ultraschall im MHz-Bereich in Flüssigkeit nach Abbildung 2 [13].

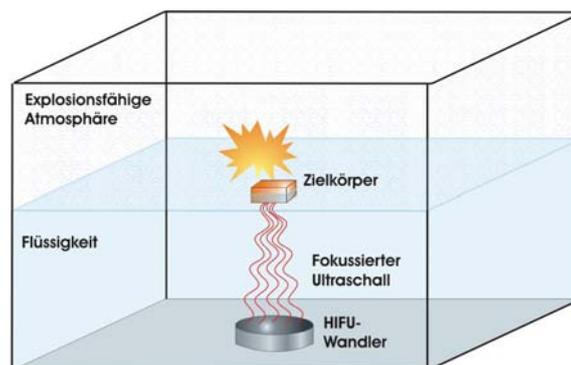


Abbildung 2: Worst-Case Situation für die Zündwirksamkeit von Ultraschall an der Flüssigkeitsoberfläche [13]

4.2.3 Akustische Kavitation

Für Ultraschall im kHz-Bereich ist die Fokussierung durch die größere Wellenlänge im Bereich von Zentimetern begrenzt. Bei diesen Frequenzen tritt jedoch starke akustische Kavitation auf. Akustische Kavitation entsteht, wenn die Schallwelle mikroskopische Gasblasen in der Flüssigkeit zur Oszillation anregt (Gasblasenkavitation) oder der Druck in der Dekompressionsphase unter den Dampfdruck der Flüssigkeit sinkt, sodass Dampfblasen entstehen (Dampfblasenkavitation). Bei hohen anregenden Schalldrücken werden die Gasblasen in der Unterdruckphase auf Größen von circa $100\ \mu\text{m}$ aufgezogen und kollabieren in der anschließenden Überdruckphase innerhalb von wenigen Mikrosekunden auf Durchmesser von circa $1\ \mu\text{m}$. Wegen dieser kurzen Kollapszeit kommt es in der Blase zu einer adiabatischen Zustandsänderung. Dabei entstehen in der Endphase des Kollapses im Inneren der Kavitationsblase Temperaturen von mehreren tausend Kelvin und extreme Drücke von mehreren hundert MPa und es konnte die Emission von Lichtblitzen einer Dauer von einigen 10 ns beobachtet werden. Gleichzeitig treten im Anschluss an den Kollaps Kühlungsraten von über $10^{12}\ \text{K/s}$ durch die umgebende Flüssigkeit auf [27, 28].

Aus sicherheitstechnischer Sicht stellt sich die Frage, ob diese Kavitationsblasen einzeln oder die Anhäufungen von Blasen angesichts der hohen Temperaturen und Drücke beim Blasen kollaps zu explosionsartigen Zündungen führen könnten, die an die Flüssigkeitsoberfläche durchschlagen und ggf. ein Bad mit brennbare Flüssigkeit in Brand setzen können. Als Worst-Case-Situation wird in diesem Zusammenhang betrachtet, dass in einer Flüssigkeit, die an eine explosionsfähige Atmosphäre angrenzt, große Kavitationsblasen erzeugt werden, die mit extern eingeleitetem ebenfalls mit explosionsfähiger Atmosphäre gefüllten Gasblasen in direkten Kontakt gebracht werden. Diese Anordnung ist in Abbildung 3 schematisch dargestellt [13]. Die Einleitung von gasgefüllten Blasen dient einerseits der Bereitstellung von Kavitationskeimen in der Nähe der Schallquelle. Zudem wurde in Flüssigkeits-Gasblasensystemen beobachtet, dass Blasen mit Durchmessern größer als 1 mm eher zu zündähnlichen Reaktionen angeregt werden können, als Blasen im Submillimeterbereich [29]. Über den Kanüldurchmesser kann die Blasengröße eingestellt werden.

4.3 Projektabschnitt 3: Zündwirksamkeit von Ultraschall gegenüber Partikeln und Staub-Luft Gemischen

4.3.1 Versuchsanordnung und Versuchsdurchführung

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 4 dargestellt. Als Versuchsgefäß wurde ein zweckmäßig modifiziertes Hartmann-

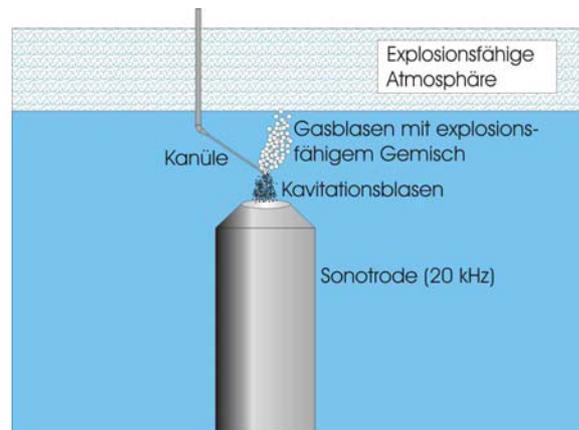


Abbildung 3: Worst-Case Situation für die Zündwirksamkeit von Ultraschall bei akustischer Kavitation [13]

Rohr verwendet, wie es als Standard-Verfahren zur Bestimmung der Mindestzündenergie von Stäuben 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 (Brüel&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 $20 \mu\text{Pa}$: $L_P = 20 \cdot \lg((p)/(20 \mu\text{Pa}))$. Auf der Oberfläche wurde ein Zielkörper mit integriertem Thermoelement (Typ K) fixiert. Mit dieser Vorrichtung ließ sich in Voruntersuchungen eine Korrelation zwischen Temperatur und Schalldruckpegel bei Erzeugung von stehenden Wellen feststellen. An der Unterseite des Hartmann-Rohrs befindet sich ein Zerstäuberpilz, der durch einen Druckstoß eingefüllten Staub aufwirbeln kann. Für Versuche mit Gas-/Dampf-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 3 verwendet. Als Zielkörpermaterial wurde nach Voruntersuchungen eine Erdalkali-Silikatwolle ausgewählt (Produktname Insulfrax) [25]. Untersucht wurde zudem die Temperaturentwicklung in Zielkörpern aus Steinwolle, einem Melaminharz-Schaumstoff (Produktname Basotect), sowie Gips. Die Körper hatten würfelförmige Abmessungen mit Kantenlängen von 5 mm

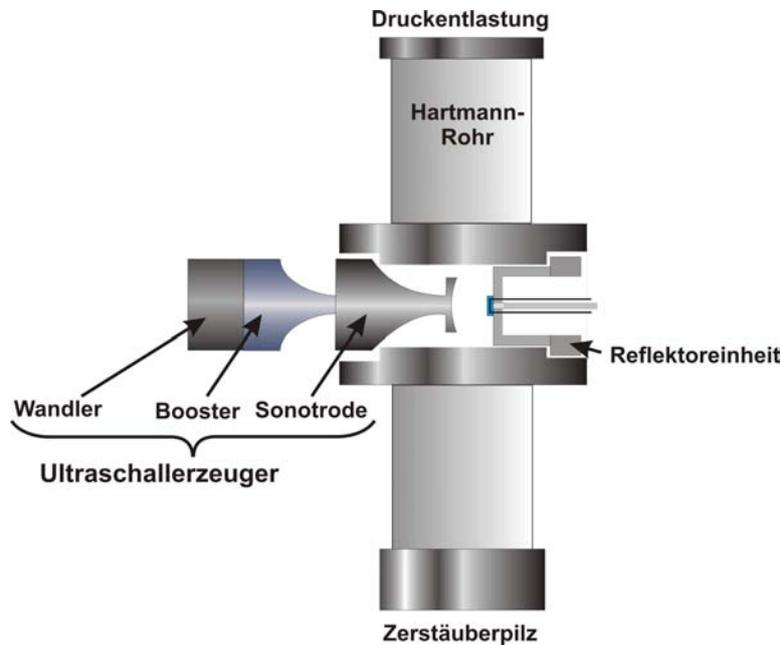


Abbildung 4: Versuchsanordnung für Zündversuche in Staub-Luft Gemischen im Ultraschallstehwellenfeld [1]

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. Anschließend wurde der Staub mittels eines kurzen Druckstoßes aufgewirbelt, sodass er in unterschiedlichen Konzentrationen das Ultraschallfeld durchlief und in Kontakt mit dem erwärmten Zielkörper kam. Im Fall einer Zündung wurde der Schalldruckpegel abgesenkt. Im Fall einer Nichtzündung wurde der Zündversuch bei gleichen Einstellungen wiederholt, bis insgesamt eine Zündgrenze festgestellt werden konnte. Auf die gleiche Weise wurden auch Zündversuche mit verdampften Flüssigkeiten 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 [30], in denen Zündversuche mit durch optische Strahlung erwärmten Zielkörpern aus schwarzem Eisenoxid durchgeführt wurden. Diese verwendeten Dämpfe sind repräsentativ für alle Gase und Dämpfe, da die Zündtemperatur das entscheidende Kriterium ist [1].

4.3.2 Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen

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 Melaminharz-Schaumstoff. 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 $179\text{ dB} \pm 2\text{ dB}$, der zu Temperaturen höher als 300°C führte. Für $178\text{ dB} \pm 2\text{ dB}$ konnten keine Zündungen beobachtet werden. Bei diesem Schalldruckpegel wurden im Mittel eine Gleichgewichtstemperatur von $266^{\circ}\text{C} \pm 7^{\circ}\text{C}$ im Kern des Zielkörpers gemessen. Für alle anderen Stäube konnten keine Zündungen beobachtet werden. Allerdings zeigten Maisstärke und Calciumstearat verkohlte Rückstände an der Zielkörperoberfläche [25]. Bei den Metallstäuben Aluminium und Magnesium waren keine Reaktionsprodukte erkennbar. Allerdings ließen sich mit der verwendeten Anlage selbst bei maximalen Schalldruckpegeln bis $185\text{ dB} \pm 2\text{ dB}$ nicht die Normzündtemperaturen von 590°C bzw. 600°C erreichen. Die Zündversuche in Dampf-Luft Gemischen lieferten lediglich Zündungen von Schwefelkohlenstoff bei Schalldruckpegeln über $180\text{ dB} \pm 2\text{ dB}$ und Temperaturen von über 350°C . Alle anderen Dämpfe konnten trotz Temperaturen oberhalb von 400°C nicht gezündet werden [1].

4.4 Projektabschnitt 4: Zündwirksamkeit von Ultraschall an der Flüssigkeitsoberfläche

4.4.1 Versuchsanordnung und Versuchsdurchführung

Auf Grundlage der theoretischen Überlegungen zur Worst-Case Situation betreffend Flüssigkeitsoberfläche von Ultraschallbädern wurden diese Bedingungen experimentell überprüft, konkretisiert und anschließend Zündversuche durchgeführt. 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 2 in einen Versuchsaufbau für Zündversuche ist in Abbildung 5 dargestellt. Der HIFU-

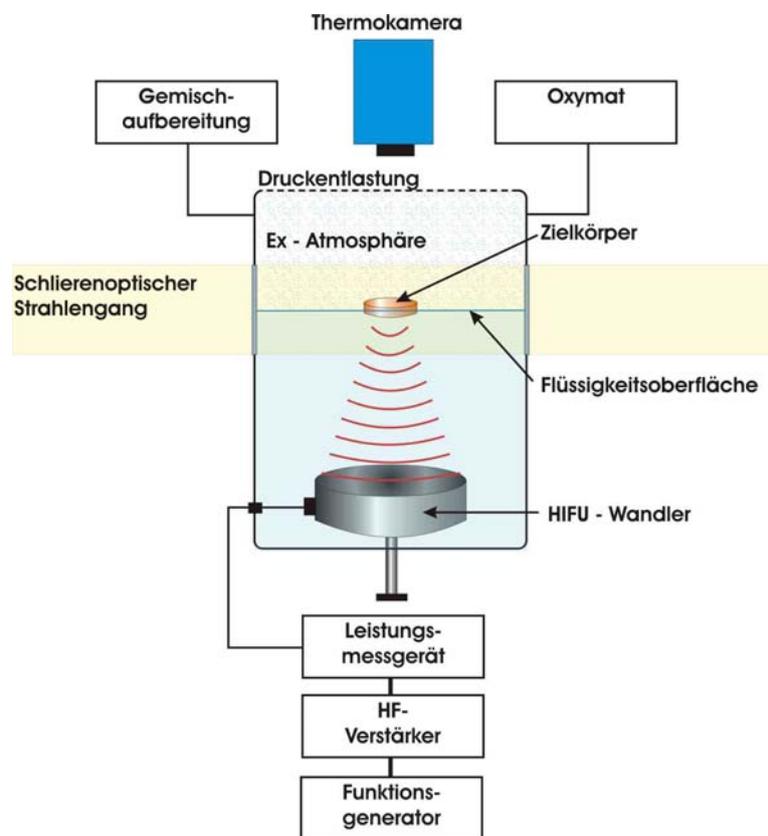


Abbildung 5: Versuchsanordnung für Zündversuche an der Flüssigkeitsoberfläche mit fokussiertem Ultraschall [1]

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 Schallstrahlungskraftwage die akustische Leistung in Abhängigkeit von der elektrischen Eingangsleistung gemessen und ein Umrechnungsfaktor bestimmt. In den Zündversuchen wurde dann die elektrische Eingangsleistung des HIFU-Wandlers 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. Der Strahlengang wurde mit einer Nikon Spiegelreflexkamera gefilmt.

Als Flüssigkeit wurde demineralisiertes und physikalisch entspanntes Wasser verwendet und die explosionsfähige Atmosphäre, wie oben beschrieben, von außen eingeleitet. Gegen die Verwendung einer brennbaren Flüssigkeit, an deren Oberfläche sich eine explosionsfähige Atmosphäre durch Verdampfen ausbilden könnte, sprachen insbesondere zwei Argumente. Erstens wäre so eine Atmosphäre weder von außen einstellbar noch hinsichtlich ihrer Schichtung zu bestimmen. Je nach Temperatur würde bis zu einer bestimmten Höhe oberhalb des Flüssigkeitsspiegels die obere Explosionsgrenze überschritten, sodass eine Zündung nicht möglich wäre. Zweitens müsste wegen der Abhängigkeit der Schallgeschwindigkeit vom Medium das Schallfeld für jede Flüssigkeit einzeln charakterisiert werden. Dies wäre zu aufwendig 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 für 5 min mit dem Brennstoff - Luft Gemisch gespült und nach Erreichen der richtigen Konzentration Thermo-, 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 min. Als Gase bzw. Dämpfe verwendet wurden Schwefelkohlenstoff (Normzündtemperatur 95°C , Normspaltweite 0,37 mm [31] bei Konzentrationen von 2% bis 10% in Luft sowie Diethylether (Normzündtemperatur 175°C , Normspaltweite 0,87 mm [31]) bei Konzentrationen von 9% bis 13% in Luft [1]. Die Konzentrationen ergaben sich auf Grundlage früherer Untersuchungen von [30].

4.4.2 Ergebnisse der Untersuchungen

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 PMMA 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. 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 am besten geeignetes Material für die Zündversuche.

Bei der Bestrahlung des PEEK-Zielkörpers an der Flüssigkeitsoberfläche erwärmte sich der Zielkörper in Abhängigkeit von der verwendeten Ultraschallleistung auf Werte von über 500°C bei einer akustischen Leistung von 48 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 $6,2 \text{ W} \pm 2\%$ womit sich Temperaturen oberhalb von 290°C erzielen ließen. Für Diethylether lag die Grenze bei $2,8 \text{ W} \pm 2\%$, womit Oberflächentemperaturen von oberhalb von 220°C erzielt wurden. Unterhalb von $2,8 \text{ W} \pm 2\%$ wurde zudem keine Bildung von Kunststoffblasen beobachtet.

Bezogen auf den Strahlbereich im Fokus mit einem Radius von 1.3 mm $\pm 8\%$ (-10 dB, d. h. Abfall der Intensität auf zehn Prozent des Maximums) lässt sich eine zeitlich und räumlich gemittelte Intensität [32] von $I_{SATA} = P/(\pi \cdot r^2) \approx 1130 \text{ mW/mm}^2 \pm 8\%$ (I_{SATA} : spacial-averaged temporal-averaged intensity) für Schwefelkohlenstoff bzw. $510 \text{ mW/mm}^2 \pm 8\%$ für Diethylether ableiten, bei der Zündungen beobachtet wurden. 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.

Die theoretischen und experimentellen Untersuchungen haben gezeigt, dass eine direkte Zündung durch das Ultraschallfeld nicht möglich ist, da wegen des Impedanzsprungs an der Phasengrenze flüssig-gasförmig die Schallwelle zu 99% reflektiert wird und intensiver Ultraschall zu einer Zerstäubung

der Flüssigkeitsoberfläche führt. Für eine Zündung ist 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 [1].

4.5 Projektabschnitt 5: Zündwirksamkeit von Kavitation in nichtentgasten Flüssigkeiten

4.5.1 Versuchsanordnung und Versuchsdurchführung

Die Umsetzung der im Abschnitt 4.2.3 beschriebenen Worst-Case Bedingungen ist schematisch in Abbildung 6 gezeigt. Es handelte sich dabei um eine Modifikation des Aufbaus aus Abschnitt 4.4, der für die Zündversuche mit fokussiertem MHz-Ultraschall verwendet wurde. 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, wurden mittels eines Abzweiges der Zuleitung des Brennstoff-Luft Gemisches 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, so dass das Gemisch durch die adiabatische Kompression in der Implosionsphase entzündet werden könnte. Andererseits könnten Kavitationsblasen mit den größeren eingeleiteten Blasen in Kontakt treten und das Gas-/Dampf-Luft Gemisch 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 zur 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

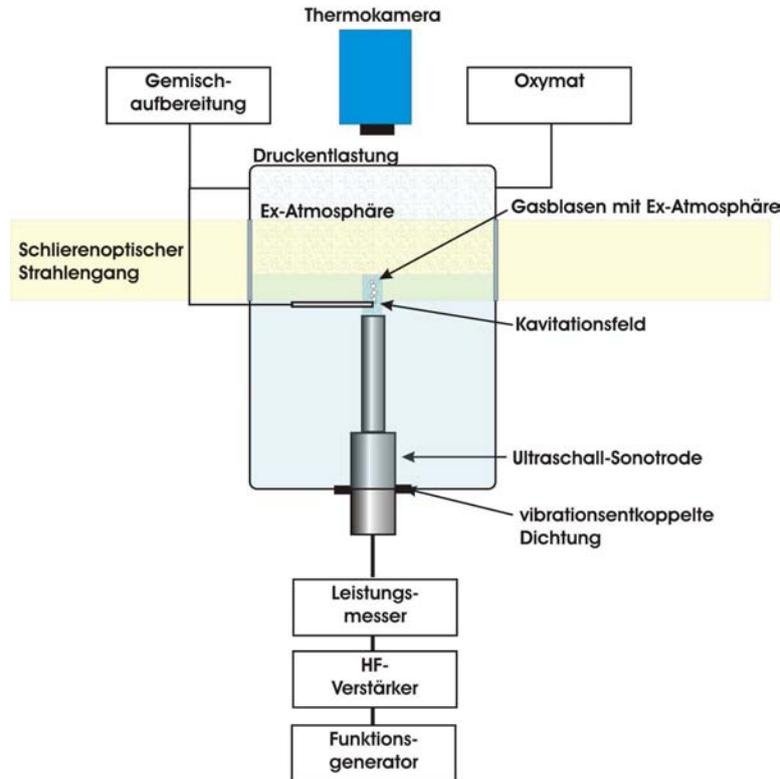


Abbildung 6: Versuchsanordnung für Zündversuche bei akustischer Kavitation [1]

noch zu verschärfen, wurde bei Beibehaltung der Wasserstoff-Luft Atmosphäre an der ein Flüssigkeitsoberfläche Wasserstoff-Sauerstoff Gemisch im Verhältnis 2:1 in das Kavitationsfeld eingeleitet. Zur Einleitung des Gas-/Dampf-Luft Gemischs in das Kavitationsfeld wurde zum einen eine Edelstahl-Fritte verwendet mit einer Porenweite von $2\ \mu\text{m}$ 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 Brennstoff-Luftblasen in die unmittelbare Nähe der Kavitationsblasenanhäufungen einzuleiten. Zudem wurde die Höhe der Wassersäule über der Sonotrodenstirnfläche variiert. Die Versuche erfolgten sowohl im Dauerschallmodus wie auch im gepulsten Modus (Pulslänge 2 s) über eine Dauer von bis zu einer Stunde [1].

4.5.2 Ergebnisse der Untersuchungen

Bei keinem der verwendeten Gas-/Dampf-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 des Wasserstoff-Sauerstoff Gemisches. Bei Verwendung von Schwefelkohlenstoff konnte eine gelbliche Trübung des Wassers beobachtet werden, die im zeitverlauf zunahm. Innerhalb einer Stunde dauerhafter Beschallung erwärmte sich das Wasser auf 95°C, was der Normzündtemperatur von Schwefelkohlenstoff entspricht. 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 mittels der Hochgeschwindigkeitskamera war erkennbar, dass die eingeleiteten Blasen unter dem Einfluss der Kavitation in kleinere Blasen zertrümmert wurden. Entsprechend der Untersuchungen von Mitropetros [29] lassen sich kleinere Blasen jedoch schlechter Zünden als größere, so dass dieser Effekt die Wahrscheinlichkeit einer Zündung der eingeleiteten Blasen verringert. Unter Verwendung der Kanüle zur Einleitung von Gas-/Dampf-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 circa 3 mm bis 5 mm. Der Effekt der Zertrümmerung der eingeleiteten Blasen durch die Kavitationsblasen war in dieser Konstellation weniger stark ausgeprägt, so dass sie gegenüber der Fritte als die kritischere gewertet wurde [1].

In den durchgeführten Untersuchungen wurde ein Versuchsaufbau verwendet, in dem die Zündung explosionsfähiger Atmosphäre provoziert werden sollte. 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 $I = P/(\pi \cdot r^2)$ der Größenordnung von 1000 mW/mm² erreicht und so den aktuell gültigen Grenzwert (1 mW/mm²) 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 [31]. Um diese Gemische möglichst direkt der Kavitationswirkung auszusetzen, wurden sie einerseits großflächig und andererseits gezielt als Blasen in das Kavitationsfeld vor der Sonotrode eingeleitet. Trotz der extremen Bedingungen konnte auch bei Beschallungsdauern von bis zu

einer Stunde 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 zu 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“ [33]). Die Ergebnisse der Untersuchungen legen den Schluss nahe, dass es zwar innerhalb der Kavitationsblasen zu zündähnlichen Reaktionen kommt, die kurze Dauer der Blasenimplosion von circa $1 \mu\text{s}$, die geringen Blasen-durchmesser um $1 \mu\text{m}$ und die -damit verbundene- 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, so dass 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 [1], was auch der Lichtemissionsdauer der Sonolumineszenz entspricht [27].

4.6 Projektabschnitt 6: Sicherheitstechnische Schlussfolgerungen

Die folgenden sicherheitstechnischen Schlussfolgerungen wurden in Kooperation mit den Experten aus dem Fachbeirat des Forschungsprojektes erarbeitet.

4.6.1 Generell

1. Ultraschall mit einer Frequenz bis 10 MHz kann unabhängig von der Art der explosionsfähigen Atmosphäre nur indirekt mit Hilfe eines schallabsorbierenden Körpers zündwirksam werden. Die direkt durch die explosionsfähige Atmosphäre absorbierte Ultraschalleistung ist bei solchen Frequenzen nicht zündwirksam.
Ultraschall mit einer Frequenz größer als 10 MHz ist in dieser Untersuchung nicht betrachtet worden. Die bestehenden Einschränkungen im einschlägigen Regelwerk (vgl. DIN EN 1127-1 und TRBS 2152, Teil 3) sollten daher aufrechterhalten werden.
2. Leicht entflammbare schallabsorbierende Materialien, z.B. Watte in Luft, sind unabhängig von der Art der explosionsfähigen Atmosphäre in starken Ultraschallfeldern grundsätzlich zu vermeiden, da sie in

Brand geraten können und auf diese Weise zündwirksam werden können.

4.6.2 Zündwirksamkeit von Ultraschall gegenüber Partikeln und Staub-Luft Gemischen

3. Ultraschall kann gegenüber explosionsfähigen Atmosphären von Stäuben nicht zündwirksam werden, 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. Dabei ist eine Messunsicherheit von 2 dB ($k=1$) berücksichtigt und ein Absorptionsgrad des Zielkörpers von 100% bei 5 kHz.
4. Kann der Grenzwert nicht eingehalten werden, ist zu verhindern, dass ortsfeste, schallabsorbierende Körper, wie insbesondere faserige Stoffe oder offene porige Schaumstoffe, Beschallungszeiten größer als 1 s ausgesetzt werden.
5. Der Grenzwert von 170 dB kann auch für explosionsfähige Atmosphären von Gasen und Dämpfen angewendet werden, da auch für diese keine zündwirksamen Temperaturen am Absorber erreicht werden können.

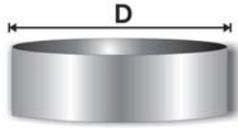
4.6.3 Zündwirksamkeit von Ultraschall an der Flüssigkeitsoberfläche

6. Ultraschall kann gegenüber explosionsfähigen Atmosphären oberhalb einer Flüssigkeitsoberfläche nicht zündwirksam werden, wenn die Schallintensität an der Flüssigkeitsoberfläche 400 mW/mm^2 nicht überschreitet, da dann keine kritischen Temperaturen an Schallabsorbern erreicht werden können, die die Flüssigkeitsoberfläche durchdringen.

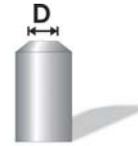
Dieser Wert beinhaltet einen Sicherheitsabstand von 20% gegenüber der experimentell ermittelten Zündgrenze für Diethylether und berücksichtigt eine Messunsicherheit von 8% ($k=1$). Der Grenzwert ist repräsentativ für alle Gase und Dämpfe, einschließlich Schwefelkohlenstoff.

7. Das Einhalten des Intensitätsgrenzwertes kann durch das nachfolgend beschriebene Verfahren nachgewiesen werden.
 - a. Für einzelne Ultraschallquellen,
 - deren Durchmesser größer oder gleich der Schallwellenlänge in der Flüssigkeit ist, darf die akustische Ausgangsleistung dieser Quelle bezogen auf das Quadrat der Schallwellenlänge

in der Flüssigkeit den Grenzwert nicht überschreiten (Fall 1). Es ist hinreichend, wenn die Bedingung für die elektrische Eingangsleistung der Quelle erfüllt ist.

Fall 1: Nachweisführung für $D \geq \lambda$

Bedingung: $P / \lambda^2 \leq 400 \text{ mW/mm}^2$

Fall 2: Nachweisführung für $D < \lambda$

Bedingung: $P / A_{\text{eff}} \leq 400 \text{ mW/mm}^2$

D : Durchmesser der abstrahlenden Ultraschallquelle

A_{eff} : abstrahlende Fläche der Ultraschallquelle

λ : Schallwellenlänge in der Flüssigkeit

P : akustische Ausgangsleistung

(oder alternativ elektrische Eingangsleistung) der Ultraschallquelle

Abbildung 7: Fallunterscheidung bezüglich der Schallquellenabmessung gegenüber der Wellenlänge

- deren Durchmesser kleiner als die Schallwellenlänge in der Flüssigkeit ist, darf die akustische Ausgangsleistung dieser Quelle bezogen auf deren abstrahlende Fläche den Grenzwert nicht überschreiten (Fall 2).
- b. Für Anordnungen aus mehreren Ultraschallquellen,
 - bei denen es zu einer additiven Überlagerung der Schallfeldmaxima im Fernfeld der Ultraschallquellen kommen kann, darf auch die Summe der nach a. berechneten Intensitäten der sich überlagernden Quellen den Grenzwert nicht überschreiten (Fall 3).
 - bei denen sich die Schallfeldmaxima der einzelnen Quellen im Fernfeld nicht mehr additiv überlagern können (Fall 4), ist die Bewertung für die einzelnen Quellen nach a. hinreichend.
- c. Überschreiten die nach a. und b. berechneten Intensitäten den genannten Grenzwert, kann das Einhalten des Grenzwertes alternativ durch Bestimmung des Schalldruckmaximums mittels Hydrophonmessung direkt unter der Flüssigkeitsoberfläche nachgewiesen werden:

Die aus dem Schalldruck berechnete Intensität $I(t) = p(t)^2 / (\rho \cdot c)$ darf den Grenzwert nicht überschreiten, dabei bezeichnet ρ die

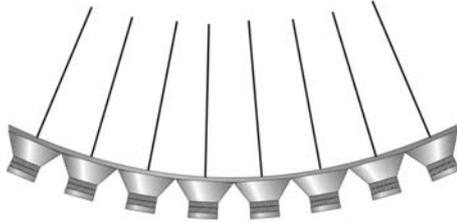


Abbildung 8:
Fall 3: Additive Überlagerung von
Quellen

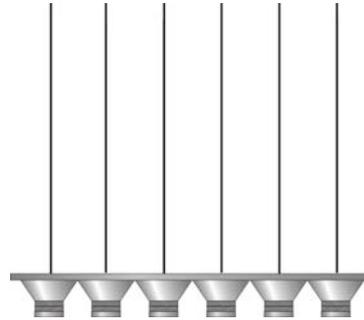


Abbildung 9:
Fall 4: Fehlende Überlagerung im
Fernfeld

Dichte und c die Schallgeschwindigkeit des Mediums (vgl. IEC 62127-1 Ed.1.1 [32]).

Im Falle räumlich stark begrenzter Schallbündel (fokussierter Ultraschall), die im Frequenzbereich oberhalb von 500 kHz vorliegen können, darf der Grenzwert auf die räumlich über den Schallbündelquerschnitt (-12 dB-Bündelfläche) gemittelte Intensität I_{SATA} (spatial-averaged time-averaged intensity, vgl. IEC 62127-1 Ed.1.1 [32]) bezogen werden. Alternativ zur Bestimmung von I_{SATA} über das Schalldruckprofil ist auch die Messung der akustischen Ausgangsleistung (vgl. IEC 61161 [34]) und Division durch die minimale -12 dB-Bündelfläche möglich.

8. Kann der Grenzwert nicht eingehalten werden, muss eine Zündung durch andere Maßnahmen ausgeschlossen werden. Als Maßnahmen kommen in Betracht:
 - Vermeiden von schallabsorbierenden Körpern, die die Flüssigkeitsoberfläche durchdringen und die eine ähnliche Schallimpedanz wie die Flüssigkeit aufweisen,
 - Vermeiden von ortsfesten Absorbern, die die Flüssigkeitsoberfläche durchdringen,
 - Begrenzung der Beschallungszeit von Absorbern, die die Flüssigkeitsoberfläche durchdringen.

4.6.4 Zündwirksamkeit von Ultraschall bei akustischer Kavitation

9. Durch Ultraschall verursachte akustische Kavitation in einer Flüssigkeit kann gegenüber explosionsfähigen Atmosphären oberhalb einer

Flüssigkeitsoberfläche nicht zündwirksam werden, da in den durchgeführten Untersuchungen auch unter sicherheitstechnisch ungünstigsten Bedingungen keine Zündung erreicht werden konnte.

5 Veröffentlichungen aus dem Gesamtvorhaben

Folgende Veröffentlichungen wurden im Rahmen des Forschungsprojektes erstellt bzw. sind angenommen:

- „Dust explosions triggered by ultrasound standing wave fields“, 9th International Workshop on Piezoelectric Applications and Transducers; Hirosaki; 2012
- „Ignition of dust-air atmospheres by ultrasonic waves“; 9th International Symposium on Hazards, Prevention, and Mitigation of Industrial Explosions; Krakau, 2012
- „Untersuchungen zur Zündquelle Ultraschall beim Einsatz in explosionsfähigen Atmosphären“; Magdeburger Brand- und Explosionsschutztag, Magdeburg, 2013
- „Zündwirksamkeit von Ultraschall beim Einsatz in explosionsfähigen Atmosphären“; BAM-PTB Kolloquium, Braunschweig, 2013
- „Incendivity of Ultrasound Applied in Explosive Atmospheres“; International Colloquium on Dynamics of Explosions and Reactive Systems; Taipeh, 2013
- „Sicherheitstechnische Schlussfolgerungen zum Einsatz von Ultraschall in explosionsfähigen Atmosphären“; 11. Fachtagung Arbeits-, Anlagen- und Umweltsicherheit; Köthen, 2013

Folgende Veröffentlichungen sind geplant:

- „Ignition of dust-air atmospheres by ultrasonic waves“, Journal of Loss Prevention in the Process Industry, Elsevier
- „Focused ultrasound as an ignition source at the phase interface liquid-gaseous“; Ultrasonics sonochemistry; Elsevier
- „Zündwirksamkeit von Ultraschall beim Einsatz in explosionsfähigen Atmosphären“; PTB-Bericht
- „Dissertation: Zündwirksamkeit von Ultraschall in explosionsfähigen Atmosphären“; TU Braunschweig
- „Staub-Explosionen in Ultraschall-Stehwellenfeldern“; deutschsprachige Zeitschriftenveröffentlichung

6 Bewertung der Ergebnisse

Erstmals konnte 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 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 um mehr als zwei Größenordnungen entsprechen. 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. Alle im Projektplan gelisteten Projektabschnitte konnten erfolgreich umgesetzt und das Projekt damit fristgerecht beendet werden. Die vorbereitenden Arbeiten (Projektabschnitt 1) lieferten keine Hinweise auf Zündungen durch Ultraschall, weder im Labor noch bei Unfällen in industriellen Anlagen. Die theoretischen Betrachtungen (Projektabschnitt 2) ergaben Worst-Case Bedingungen, die Zündungen durch Ultraschall provozierten. Zudem ließen sich unterschiedliche Leistungsultraschallquelle beschaffen, sodass sich diese Worst-Case Situationen in Versuchsanordnungen zur experimentellen Untersuchung umsetzen ließen. Im Fall der Zündversuche in Staub-Luft Gemischen (Projektabschnitt 3) und an Flüssigkeitsoberflächen (Projektabschnitt 4) konnten dabei Zündungen erzielt werden. Zudem konnten Grenzwerte und Randbedingungen für den sicheren Betrieb ermittelt werden. Die Zündversuche mit Kavitation (Projektabschnitt 5) lieferten keine Zündungen. Zwar könnte versucht werden, mit noch stärkeren Sonotroden oder auf anderem Wege noch stärkere akustische Kavitation zu erzeugen. Allerdings sind diesem Phänomen technische Grenzen gesetzt, da das Aufreißen der Flüssigkeit bei der Kavitation dazu führt, dass sich die Schallwelle immer schlechter in die Flüssigkeit einkoppeln lässt. Die verwendeten Dampf-/Gas-Luft/Sauerstoff Gemische bilden den Worst-Case hinsichtlich der explosionsfähigen Atmosphäre nach. Zudem konnte sichergestellt werden, dass Kavitation und Brennstoff Gemisch in direkten Kontakt gekommen sind, sodass akustische Kavitation als Zündmechanismus aufgeschlossen werden kann. In Diskussion im Fachbeirat konnten letztlich sicherheitstechnische Schlussfolgerungen (Projektabschnitt 6) gezogen werden, die in Abschnitt 4.6 dargestellt sind.

7 Umsetzungs- und Verwertungsplan

Die Ergebnisse sollen später in das sicherheitstechnische Regelwerk (BG-Regeln und Normen) einfließen. Die Umsetzung in das berufsgenossenschaftliche Regelwerk geschieht über die am Projekt beteiligten Kooperationspartner. Die Umsetzung in die Normung kann über den Projektleiter geschehen, der persönliches Mitglied in den einschlägigen Normungsgremien auf nationaler europäischer und internationaler Ebene ist (u. a. CEN TC 305 WG4 für die EN 1127-1 und DIN NASG 095-02 Fachbeirat). Angesichts der sicherheitstechnischen Schlussfolgerungen gemäß Abschnitt 4.6 ist ein Workshop zur Zündquelle Ultraschall nicht sinnvoll, da keine anwendungsbezogenen Handlungsempfehlungen für den Umgang mit Ultraschall im explosionsgefährdeten Bereich gegeben werden können. Stattdessen wurde in der letzten Fachbeiratssitzung beschlossen, auf diesen zu verzichten und stattdessen die Ergebnisse in Fach- und Anwenderkreisen vorzustellen, bzw. die Ergebnisse auf Internetportalen der Kooperationspartner und auf der Internetseite vom Fachverband industrielle Teilereinigung e.V (www.FIT-online.de) zu veröffentlichen.

8 Anhang

Liste von externen Experten

Im Verlauf des Forschungsprojektes wurden über die Kooperationspartner hinaus folgende externe Experten befragt:

1. Dr. Lierke, ehemals Battelle Institut Frankfurt (1970-1993)
2. Dr. Mettin, Drittes Physikalisches Institut, Universität Göttingen
3. Prof. Tobias Hemsel, Universität Paderborn
4. Harold C. Robinson und Ahmed Amin, Naval Undersea Warfare Center Division Newport, USA
5. Prof. J.A. Gallego-Juárez, Power Ultrasonics Group, Higher Council for Scientific Research(CSIC), Madrid, Spanien

Wirkung und Anwendungen von Ultraschall

Tabelle 1: Wirkungen von Ultraschall

Wirkung	Beschreibung
Hitze	Bei der Durchstrahlung eines Medium geht Energie in Form von Wärme verloren. Diese Verluste sind materialabhängig. Die dem Schall entzogene Energie wird auf das Medium übertragen und kann zu lokalen Erwärmungen führen.
Durchmischung	In fluiden Medien führt der Ultraschall zu heftigen Bewegungen der Fluidteilchen. Dies unterstützt die Verteilung bzw. Lösung von Schwebstoffen in dem Fluid. Dieser Effekt wirkt der Akumulation von Wärme entgegen.
Kavitation	Ein wichtiges Phänomen im Zusammenhang mit Ultraschall in Flüssigkeiten ist das Auftreten von Kavitation. In den Unterdruckphasen des Schwingungszyklus reißt die Flüssigkeit an Inhomogenitäten wie gelösten Gasen oder Schwebstoffen auf. Die Blasen pulsieren im Schallfeld, wachsen an und kollabieren. Resultat sind insbesondere kurzzeitig auftretende extreme Temperaturen und Druckanstiege sowie starke Strömungen.
chemische Wirkung	Unter den extremen Bedingungen bei der Kavitation können bestimmte chemische Sekundärreaktionen ablaufen. Insbesondere Oxidationsvorgänge werden stark beschleunigt.
mechanische Effekte	Spannungen in Ultraschallfelder können zu Brüchen in Materialien führen. Zudem können Relativbewegungen zwischen Oberflächen angeregt werden, sodass die Energie an der Reibstelle selektiv absorbiert werden kann.
Diffusion	Ultraschall fördert die Diffusion durch Zellwände, in Gele und durch bestimmte poröse Membrane.
Vakuum Effekt	In der Unterdruckphase eines Schwingungszyklus können Fluide in feine Poren und Spalten eindringen.

Tabelle 2: Anwendungen von Leistungs-Ultraschall [35]

Anwendungsgebiet	Verfahren	Medium	Frequenzbereich	EX-Atmosphäre
Mess- und Medizintechnik	Durchflussmessung	Flüssigkeit	bis 2 MHz	Gase
	Füllstandsmessung	Luft/Gas	20 - 100 kHz	Staub
	Entfernungsmessung	Luft, Wasser, Feststoff	15 kHz - 10 MHz	ev. Gase, Stäube
	Ultraschall-Bildgebung	Wasser/ Gewebe	1 - 100 MHz	Anästhetika
	Tumorbehandlung	Wasser/ Gewebe	250 kHz - 2,5 MHz	Anästhetika
Fügen/ Umformen	Ultraschall-Schweißen	Festkörper	20 - 40 kHz	Klebestellen: Tenside, Lösungsmittel
	US- Löten	Kunststoff, Keramik, Glas, Metall	20 - 40 kHz	Klebestellen: Tenside, Lösungsmittel
	US-Bohren	Feststoff, Schleif-suspension	20 - 40 kHz	
Prozesstechnik	Reinigen	Flüssigkeit	20 - 120 kHz	Dämpfe, Nebel
	Sieben	Luft/Gas	20 - 50 kHz	Pulver/Staub
	Homogenisieren, Emulgieren, Zellesintegration	Flüssigkeit	20 kHz	Dämpfe, Nebel
	Zerstäuben von Flüssigkeiten	Anästhetika, Treibstoffe	20 kHz - 3 MHz	Dämpfe, Nebel
	Entgasen von Flüssigkeiten	Flüssigkeit	20 - 40 kHz	Dämpfe, Nebel
	Aquasonolyse	wässrige Lösungen	100 kHz - 1 MHz	ev. Gase
Erzaufbereitung/ Metallurgie	Flotation	wässrig, mit Zusätzen (Säuren, Basen, Öle)	20 kHz	Schäume, Dämpfe
	Desintegration von Festkörpern	Alkohol, Benzin	variabel, Mehrfrequenz-verfahren	Dämpfe
	Hydrometallurgie	wässrige Lösungen, Säure	20 kHz	Dämpfe
	Pyrometallurgie	Schmelzen	20 kHz	

Verwendete Stäube

Tabelle 3: Kennzahlen zu den untersuchten Stäuben

Stoff	Verwendete Stäube														
	Staubzustand						Kenngrößen aufgewirbelten Staubes								
	Korngrößenverteilung μm					Median	Feuchte	UEG	max. Explosionsüberdruck	K_St-Wert	Staubexplosionsklasse/-fähigkeit	MZE	Zündtemperatur	Brennverhalten	
	< 500	< 250	< 125	< 63	< 32	< 20									
Gew. %					μm	Gew. %	g m^{-3}	bar	$\text{bar} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$		mJ	$^{\circ}\text{C}$	BZ		
Schwefel	100	99	89	52		30	0,3	60	5,5	111	St 1	> 1 / < 3	250	5	
Calciumstearat				100	94	92	< 10	0,6	30	8	190	St 1	> 3 / < 10	400	3
Maisstärke			100	99	92	79	10	8,6	125	8,3	132	St 1	> 30 / < 100	380	3
Magnesium			100	37	1		70	0,1	20	7,2	51	St1		600	4
Aluminium	100	99	95	77		17	0,5	60	10,4	654	St3		590	4	

Literatur

- [1] L.H. Simon, T. Fedtke, V. Wilkens, and M. Beyer. Zündwirksamkeit von Ultraschall beim Einsatz in explosionsfähigen Atmosphären. In *13. BAM-PTB-Kolloquium, Braunschweig*, 2013.
- [2] EN 1127-1. Explosive atmospheres – Explosion prevention and protection – Part 1: Basic concepts and methodology, 2011.
- [3] Technische Regeln für Betriebssicherheit TRBS 2152 Teil 3. Gefährliche explosionsfähige Atmosphäre – Vermeidung der Entzündung gefährlicher explosionsfähiger Atmosphäre.
- [4] H. Kuttruff. *Physik und Technik des Ultraschalls*. Hirzel Verlag, 1988.
- [5] J. A. Gallego-Juárez, G. Rodríguez, V. Acosta, and E. Riera. Power ultrasonic transducers with extensive radiators for industrial processing. *Ultrasonic Sonochemistry*, 17:953–964, 2010.
- [6] E. R. De Sarabia, J. A. Gallego-Juárez, G. Rodríguez-Corral, L. Elvira-Segura, and I. González-Gómez. Application of high-power ultrasound to enhance fluid/solid particle separation processes. *Ultrasonics*, 38:642–646, 2000.
- [7] L.V. King. On the acoustic radiation pressure on spheres. *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, 147:212, 1934.

- [8] L.P. Gor'kov. On the forces acting on a small particle in an acoustical field in an ideal fluid. *Soviet Physics Doklady, translated from Doklady Akademii Nauk SSSR*, 6(9):773–775, 1962.
- [9] M. Settnes and H. Bruus. Forces acting on a small particle in an acoustical field in a viscous fluid. *Physical review. E, Statistical, nonlinear, and soft matter physics*, 85:016327–1 – 016327–12, 2012.
- [10] T. Hemsel, C. Hennig, C. Kauczor, and W. Littmann. Powder coating fabrication by ultrasonic standing wave atomizer. *HNI Verlagsschriftenreihe*, 180:183–186, 2005.
- [11] D. Ensminger. *Ultrasonics - Fundamentals, Technology, Applications*. Dekker, Inc., 1988.
- [12] K.S. Suslick. *Ultrasound - Its Chemical, Physical, and Biological Effects*. VCH Publishers, Inc., 1988.
- [13] L.H. Simon, V. Wilkens, and M. Beyer. Untersuchungen zur Zündwirksamkeit von Ultraschall in explosionsfähigen Atmosphären. In *Magdeburger Brand- und Explosionsschutztag*, 2013.
- [14] J. Vestweber. *Einsatzmöglichkeiten der Ultraschallstehwellenerstreuung in der Lackiertechnik - Vergleich der Tropfengrößenverteilungen mit pneumatischer, hydraulischer und Hochrotationszerstäubung*. PhD thesis, Fakultät der Naturwissenschaften, Department Chemie, Universität Paderborn, 2004.
- [15] H.E. Bass; L.C. Sutherland; A.J. Zuckerwar. Atmospheric absorption of sound: Update. *Journal of the Acoustical Society of America*, 88(4):2019–2021, 1990.
- [16] L.B. Evans; H.E. Bass; L.C. Sutherland. Atmospheric absorption of sound: Theoretical predictions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 51(5):1565–1575, 1972.
- [17] Y. Dain and R.M. Lueptow. Acoustic attenuation in a three-gas mixture: Results. *Journal of the Acoustical Society of America*, 110(6):2974–2979, 2001.
- [18] S. G. Ejakov. Acoustic attenuation in gas mixtures with nitrogen: experimental data and calculations. *Acoustical Society of America*, 113(4):1871 – 1879, 2003.
- [19] J.R. Allegra; S.A. Hawley. Attenuation of sound in suspensions and emulsions: Theory and experiments. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 52(5B):1545–1564, 1972.

- [20] P.S. Epstein; R.R. Carhart. The absorption of sound in suspensions and emulsions. i. water fog in air. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 25(3):553–565, 1953.
- [21] F.A. Lyman. Attenuation of high-intensity sound in a droplet laden gas. *Journal of sound and vibration*, 51:219–235, 1977.
- [22] J.W. Zink and L.P. Delasso. Attenuation and dispersion of sound by solid particles suspended in a gas. *Journal of the Acoustic Society of America*, 30:765–771, 1958.
- [23] J. A. Gallego-Juárez, G. Rodríguez, J.L. San Emerto, P.T. Sanz, and J.C. Lázaro. An acoustic transducer system for long-distance ranging applications in air. *Sensor and Actuators A*, 37-39:397–402, 1993.
- [24] W.L. Nyborg. Heat generation by ultrasound in a relaxing medium. *Journal of the Acoustic Society of America*, 70(2):310–312, 1981.
- [25] L.H. Simon, V. Wilkens, T. Fedtke, and M. Beyer. Ignitions of dust-atmospheres by ultrasonic waves. In *International Symposium on Hazard, Prevention and Mitigation of Industrial Explosions*, Krakau, 2012.
- [26] V. Deutsch, M. Platte, and M. Vogt. *Ultraschallprüfung: Grundlagen und industrielle Anwendungen*. Springer Verlag, Berlin, 1997.
- [27] K.S. Suslick and D.J. Flannigan. Inside a collapsing bubble: Sonoluminescence and the conditions during cavitation. *Annual Review of Physical Chemistry*, 59:659–683, 2008.
- [28] J. Lifka, B. Ondruschka, and J. Hofmann. Einsatz von Ultraschall zum Schadstoffabbau in Wasser: Aquasonolyse – Eine Übersicht. *Chemie Ingenieur Technik*, 74:403–413, 2002.
- [29] K. Mitropetros. *Shock induced bubble explosions in liquid cyclohexane*. PhD thesis, Technischen Universität Berlin, 2005.
- [30] M. M. Welzel, S. Schenk, M. Hau, H. K. Cammenga, and H. Bothe. Ignition of combustible/air mixtures by small radiatively heated surfaces. *Journal of Hazardous Materials*, 72:1–9, 2000.
- [31] E. Brandes and W. Möller. *Safety Characteristic Data , Volume 1: Flammable Liquids and Gases*. Wirtschaftsverlag NW, 2 edition, 2008.
- [32] IEC 62127-1. Ultrasonics – Hydrophones – Part 1: Measurement and characterization of medical ultrasonic fields up to 40 MHz. Geneva: International Electrotechnical Commission Publication 62127-1, 2007.
- [33] Q. V. Nguyen and D. A. Jacqmin. A study of cavitation-ignition bubble combustion. Technical report, NASA Glenn Research Center, 2005.

- [34] IEC 61161 Ed.3. Ultrasonics – Power measurement – Radiation force balances and performance requirements.
- [35] O.V. Abramov. *High-Intensity Ultrasonics - Theory and Industrial Applications*. Gordon and Breach Science Publishers, 1998.



Herausgeber:

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin

Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Bundesallee 100
38116 Braunschweig

Telefon: (05 31) 592-93 21
Telefax: (05 31) 592-92 92
www.ptb.de

Vertrieb:

Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH

Zweite Schlachtpforte 7
28195 Bremen

Telefon: (04 21) 369 03-0
Telefax: (04 21) 369 03-63
www.schuenemann-verlag.de