

# „Impulsschall/Transientenschall“

## Programm und Kurzfassungen der Vorträge

(Stand: 15.10.2018)

24. Workshop „Physikalische Akustik“ im Physikzentrum Bad Honnef, gemeinsam veranstaltet vom Fachausschuss Physikalische Akustik der Deutschen Gesellschaft für Akustik (DEGA) und vom Fachverband Akustik der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG)

Donnerstag, 18.10.2018

Mittlerer Hörsaal (im rechten Seitenflügel, 1. OG)	
9:00	<b>Willkommen</b> Joachim Bös, Stephan Lippert, Martin Ochmann
9:10	<b>1. Physikalische Aspekte der Schießgeräusche</b> Karl-Wilhelm Hirsch Cervus Consult GmbH, Willich
9:50	<b>2. Sprengungen als impulsartige Schallquelle unter Wasser</b> Edgar Schmidtke Schock- und Vibrationszentrum, Wehrtechnische Dienststelle für Schiffe und Marine- waffen, Maritime Technologie und Forschung – WTD 71, Eckernförde
10:30	Kaffeepause
11:00	<b>3. Bewertung komplexer Druckstoßausbreitung im urbanen Raum</b> <u>Kai Fischer</u> , Arno Klomfass Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut (EMI), Freiburg
11:40	<b>4. Effiziente Randelementmethoden im Zeitbereich für Schallemission und Schallausbreitung</b> <u>Heiko Gimperlein</u> <sup>a</sup> , Ernst P. Stephan <sup>b</sup> <sup>a</sup> Department of Mathematics, Heriot-Watt University, Edinburgh, Schottland <sup>b</sup> Institut für Angewandte Mathematik, Leibniz Universität Hannover
12:20	Mittagessen
13:30	<b>gemeinsame Sitzung</b> des Fachausschusses Physikalische Akustik der Deutschen Gesellschaft für Akustik (DEGA) und des Fachverbands Akustik der Deutschen Physikalischen Gesellschaft (DPG)
14:00	<b>5. Impulsantworten über Impedanzböden</b> <u>Martin Ochmann</u> , Rafael Piscoya Projektgruppe Computational Acoustics, Beuth Hochschule für Technik Berlin
14:40	<b>6. Indirekte Messung von transienten Kräften beim Gehen auf Holzdecken</b> <u>Wolfgang Kropp</u> , Nata Amiryarahmadi Applied Acoustics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden
15:20	<b>7. Stoßgeräusche bei Scheinfugen auf Betonoberflächen</b> Wolfgang Kropp Applied Acoustics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden
16:00	Kaffeepause
16:30	Raumwechsel in den Wilhelm und Else Heraeus-Hörsaal

<b>Wilhelm und Else Heraeus-Hörsaal:</b>	
<b>Gemeinsame Sitzung mit dem Arbeitskreis Energie der DPG</b>	
16:45	<b>8. Unterwasser-Rammschall – Eine Herausforderung bei der Errichtung von Offshore-Windparks und für die numerische Simulation</b> Stephan Lippert Institut für Modellierung und Berechnung, Technische Universität Hamburg
17:30	<b>9. Geophysikalische Untersuchungen zu maritimen Gashydratvorkommen</b> Michael Riedel GEOMAR, Helmholtz Centre for Ocean Research, Kiel
18:15	<b>10. Neue Möglichkeiten für geophysikalische Exploration und Monitoring mit ortsverteilten akustischen Messungen</b> Jan Henniges Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam
19:00	Ende des Vortragsprogramms am Donnerstag
ab 19:30	gemeinsames Abendessen im Lichtenberg-Keller

**Freitag, 19.10.2018**

<b>Mittlerer Hörsaal (im rechten Seitenflügel, 1. OG)</b>	
8:10	<b>11. Aspekte der anhaltenden Notwendigkeit von F&amp;T-Aktivitäten hinsichtlich Schießlärm aus Sicht der Bundeswehr</b> Thomas Weßling Wehrtechnische Dienststelle für Waffen und Munition – WTD 91, Meppen
8:40	<b>12. Vergleich von Zeitbereichsmodellen für das Rad-Schiene-Rollgeräusch</b> <u>Ina Richter</u> , Jeffrey Thomsen, Katja Stampka, Ennes Sarradj Fachgebiet Technische Akustik, Technische Universität Berlin
9:20	<b>13. Numerische Simulation der Blasenkollapsdynamik und -interaktion mit fluidischen Gewebegrenzflächen</b> <u>Jakob Kaiser</u> , Stefan Adami, Ivan Bermejo-Moreno, Nikolaus A. Adams Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungsmechanik, Technische Universität München
10:00	Kaffeepause
10:30	<b>14. Impulsübertragung und Trägheit, Mechanismen der Steinertrümmung durch Stosswellen</b> Othmar Wess Storz Medical AG, Tägerwil, Schweiz
11:10	<b>15. Stoßwellen und Druckpulse in der Medizin – Normung im Spagat zwischen medizinischer Anwendung und technischer Umsetzung</b> Friedrich Ueberle Department Medizintechnik, Fakultät Life Sciences, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW)
11:50	<b>16. Limitationen der Übertragbarkeit technischer Stoßwellenparameter auf die mechanobiologische Wirkung</b> Matias de la Fuente Klein Lehrstuhl für Medizintechnik, Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik, RWTH Aachen
12:30	Mittagessen (Ende des Workshops)

# Kurzfassungen/Inhalte der Vorträge

## 1. Physikalische Aspekte der Schießgeräusche

Karl-Wilhelm Hirsch  
Cervus Consult GmbH, Willich

Zu den Schießgeräuschen gehören alle Schalle, die beim Schießen und Sprengen entstehen. Im Bereich des sportlichen, jagdlichen und polizeilichen Schießens stehen Handwaffen im Vordergrund. Aber auch die Knalle von Feuerwerken spielen grundsätzlich eine Rolle. Beim militärischen Schießen kommen großkalibrige Rohrwaffen, Raketen und Sprengungen aller Art hinzu.

Die Schießgeräusche bilden eine eigene Geräuschquellenart mit einigen Alleinstellungsmerkmalen: (1) Die Geräusche sind durchweg hochenergetische, breitbandige, in vielen Fällen stark gerichtete Schallimpulse. (2) Es sind jedes Mal Einzelereignisse, deren Quelle nicht durch Schallleistung sondern durch Schallenergie gekennzeichnet wird. (3) Im Nahbereich der Quellen gilt die ‚lineare‘ Näherung der Akustik nicht: Es kommt zu pegel- und laufstreckenabhängigen Veränderungen der Signalformen und äquivalenten Änderungen des Spektrums.

Physikalische Modelle zur Beschreibung der Vorgänge beim Schießen und Sprengen sind hoch komplex. Sie müssen – ausgehend von der Explosion von Treibladungen – die Innenballistik in einem Rohr so beschreiben, dass sich daraus sachgerechte akustische Parameter ableiten lassen, um die Schallausbreitung zu beschreiben. In der Lärmakustik wird deshalb auf Quellmodelle zurückgegriffen, die auf vereinfachten Annahmen beruhen.

Der Vortrag stellt die Konzepte der Quellmodelle für den Mündungsknall und den Geschosknall vor. Anhand von exemplarischen Messergebnissen werden einige Besonderheiten der Messung von Waffenknallen im Freien diskutiert.

## 3. Bewertung komplexer Druckstoßausbreitung im urbanen Raum

Kai Fischer, Arno Klomfass  
Fraunhofer-Institut für Kurzzeitdynamik, Ernst-Mach-Institut (EMI), Freiburg

Der Fund von Blindgängern des zweiten Weltkriegs oder terroristische Ereignisse stellen immer wieder ein Gefährdungspotenzial in Form von Detonationen für Menschen in städtischen Gebieten dar. Zur Ableitung von geeigneten Schutzmaßnahmen bildet im ersten Schritt eine Abschätzung des Gefahrenpotenzials die Grundlage für weiterführende Verwundbarkeits- oder Risikoanalysen. Semi-empirische Ansätze, wie sie derzeit von Kampfmittelräumdiensten angewandt werden, liefern schnelle Resultate, um die Größe des Gefahrenbereichs abzuschätzen, besitzen jedoch nur Gültigkeit für eine sich frei ausbreitende Stoßwelle. Ähnlich zur Schallausbreitung wird die Stoßwelle durch die Bebauung an einer freien Ausbreitung gehindert und es können Abschattungs- oder Fokussierungseffekte auftreten. Basierend auf einem Finite-Volumen-Verfahren wird in diesem Vortrag eine Software vorgestellt, die es ermöglicht, die komplexe Druckstoßausbreitung zu analysieren und in der Gefährdungsanalyse zu berücksichtigen. Weiterhin werden physikalische Eigenschaften untersucht, wie sie auch von einer Schallquelle ausgehen. Die Erkenntnisse fließen in verschiedene Schutzmaßnahmen ein, um somit die Resilienz und die Robustheit einer Stadt nachhaltig zu steigern

#### **4. Effiziente Randelementmethoden im Zeitbereich für Schallemission und Schallausbreitung**

Heiko Gimperlein<sup>a</sup>, Ernst P. Stephan<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Department of Mathematics, Heriot-Watt University, Edinburgh, Schottland

<sup>b</sup> Institut für Angewandte Mathematik, Leibniz Universität Hannover

Der Vortrag gibt eine Übersicht über die aktuelle Arbeit unserer Gruppe zu Randelementmethoden für die zeitabhängige Schallemission und Schallausbreitung. Mit Hinblick auf die Schallemission im Straßenverkehr betrachten wir insbesondere auch numerische Methoden für singuläre Geometrien, wie die Horngemetrie zwischen Reifen und Straße. Ansatzfunktionen höheren Polynomgrades und adaptiv verfeinerte Gitter erlauben die effiziente Berechnung auch singulärer Lösungen. Numerische Beispiele für die Schallemission von Reifen zeigen die Relevanz der entwickelten Methoden für Anwendungen.

#### **5. Impulsantworten über Impedanzböden**

Martin Ochmann, Rafael Piscoya

Projektgruppe Computational Acoustics, Beuth Hochschule für Technik Berlin

Es werden Impulsantworten in Halbräumen über Impedanzböden betrachtet, die beispielsweise für die Vorhersage der Schallausbreitung im Freien benötigt werden. Hierfür ist es notwendig, die üblicherweise im Frequenzbereich formulierten Randbedingungen in den Zeitbereich zu übertragen. Für rein absorbierende und massenartige Randbedingungen wurden geschlossene Lösungen für die Impulsantwort des Halbraumes gefunden, die für Benchmarktests und Fehlerabschätzungen von Randelementeformulierungen im Zeitbereich verwendet werden können. Analytische Lösungen können mittels Faltung auch für bestimmte Zeitsignale wie z. B. Dreieck- oder Rechteckimpulse bestimmt werden. Für komplexere Eigenschaften des Untergrundes muss die Impulsantwort numerisch bestimmt werden. Animationen sollen ein anschauliches Bild der Signale vermitteln

#### **6. Indirekte Messung von transienten Kräften beim Gehen auf Holzdecken**

Wolfgang Kropp, Nata Amiryarahmadi

Applied Acoustics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden

Die Kenntnis der transienten Kräfte, die beim Laufen oder Springen auf einem Boden entstehen, sind von großem Interesse für ein besseres Verständnis der Trittschallisolierung speziell von Leichtbaukonstruktionen wie z. B. Holzdecken. Die direkte Messung solcher Kräfte ist problematisch da z. B. in Schuhe eingebaute Kraftgeber den Vorgang des Gehens stark beeinflussen. Außerdem ist solch eine Vorgehensweise nur für sehr grobes Schuhwerk und schon gar nicht für den Fall des Barfußlaufens geeignet. Stattdessen wird eine indirektes Zeitbereichsverfahren benutzt, das auf dem üblicherweise für das Filterdesign benutzten Least-Mean-Square- (LMS-) Algorithmus aufbaut. Die Anwendung wird im Zeitbereich für einige Fälle demonstriert. Dabei zeigt sich, dass im Gegensatz zu den üblichen Frequenzbereichsverfahren für indirekte Probleme dieser Ansatz sehr robust ist und auch für niedrige Signal-Rausch-Verhältnisse noch gute Ergebnisse liefert. Die so erhaltenen Kräfte werden in einem einfachen Modell für die virtuelle Erzeugung von Trittschall benutzt.

## **7. Stoßgeräusche bei Scheinfugen auf Betonoberflächen**

Wolfgang Kropp

Applied Acoustics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Schweden

Beim Überfahren von Scheinfugen in Betonoberflächen entsteht ein impulsartiges Geräusch, das bei akustisch optimierten Oberflächen bestimmend für den Vorbeifahrtpegel sein kann. Das Geräusch ist stark von den Resonanzen des Reifeninnenraums beeinflusst. Daher bedarf es für die Modellierung eines Reifenmodells, das sowohl die Reifenstruktur als auch den luftgefüllten Innenraum und die Felge berücksichtigt. Dieses Modell in Kombination mit einem nicht-linearen transienten Kontaktmodell und einem Abstrahlmodell erlaubt die Vorhersage von Stoßgeräuschen bei Scheinfugen. Ergebnisse der Simulation werden mit Messungen im CPX-Anhänger verglichen. Eine Parameterstudie zeigt den Einfluss der wichtigsten Kenngrößen für Scheinfugen auf das Stoßgeräusch.

## **8. Unterwasser-Rammschall – Eine Herausforderung bei der Errichtung von Offshore-Windparks und für die numerische Simulation**

Stephan Lippert

Institut für Modellierung und Berechnung, Technische Universität Hamburg

Beim Ausbau erneuerbarer Energien kommt der Offshore-Windenergie eine tragende Rolle zu, so dass inzwischen weltweit eine Vielzahl von Windkraftanlagen im Meer installiert wird. Das gängige Gründungsverfahren zur Errichtung von Offshore-Windparks ist die Schlagrammung, bei der stählerne Gründungspfähle mit Hilfe hydraulisch betriebener Impulshammer in den Meeresboden getrieben werden. Der bei der Rammung entstehende signifikante Schalleintrag in das umliegende Meerwasser kann dabei eine schädigende Wirkung auf marine Lebensformen, wie z. B. den Schweinswal, haben, so dass in der Regel spezifische Bestimmungen oder Grenzwerte einzuhalten sind. Um dies sicherzustellen, werden verschiedene Schallschutzmaßnahmen eingesetzt. Aufgrund der Komplexität und der immensen Kosten von Offshore-Tests sind verlässliche numerische Modelle notwendig, um bereits vor Beginn der Bauarbeiten sichere Prognosen bzgl. des Schalleintrages vornehmen zu können und die Schallschutzsysteme weiter zu optimieren. Der vorliegende Beitrag gibt einen Überblick über die Rammschallproblematik und die typischen Modellierungsansätze, die dabei zur Anwendung kommen.

## **9. Geophysikalische Untersuchungen zu maritimen Gashydratvorkommen**

Michael Riedel

GEOMAR, Helmholtz Centre for Ocean Research, Kiel

Gashydrate, auch Clathrate genannt, sind chemische Verbindungen aus natürlichen Vorkommen an Kohlenwasserstoffen (meistens Methan) und Wasser. Diese sind unter bestimmten Druck- und Temperaturbedingungen als feste Substanzen in marinen Sedimenten der Kontinentalränder weit verbreitet, können aber auch in polaren Gebieten oder Hochgebirgslagen zusammen mit Permafrost auftreten. Aufgrund der weiten geographischen Verbreitung und der kompakten Speicherung an Methan ( $1 \text{ m}^3 \text{ Hydrat} = 64 \text{ m}^3 \text{ freies Gas}$ ) werden Gashydrate von einigen Ländern (Japan, Indien, China, USA) als zukünftige alternative Energiequellen gehandelt. Allerdings sind Gashydrate gerade wegen des hohen Gehaltes an Kohlenwasserstoffen prinzipiell ein weiterer fossiler Brennstoff mit allen damit verbundenen Konsequenzen, der außerdem nur schwer förderbar ist, da das Methan zuerst aus dem festen Zustand (z. B. im marinen Sediment bei Wassertiefen von mindestens 500 m und zum Teil hunderte Meter unter dem Meeresboden gelegen) befreit und dann über längere Strecken transportiert werden muss, bevor es zur Energiegewinnung geeignet ist. Verschiedene geophysikalische Messverfahren existieren, um Gashydrate zu detektieren und die potenziellen Lagerstätten zu quantifizieren.

Am häufigsten werden dazu seismische (akustische) Verfahren benutzt, aber es werden in letzter Zeit auch vermehrt elektromagnetische Techniken angewendet. Seismische Verfahren nutzen dabei die Veränderungen in den physikalischen Eigenschaften der Schallgeschwindigkeit, Dichte und Porosität in den hydratführenden Schichten im Sediment aus, wohingegen die elektromagnetischen Verfahren den stark erhöhten spezifischen Widerstand von hydratführenden Sedimenten ausnutzen, um diese zu detektieren. Zusammen mit Testbohrungen, zum Teil im Rahmen des Ozeanbohrprogrammes „International Ocean Discovery Program“ und der Vorläuferprogramme „Deep Sea Drilling Program, Ocean Drilling Program“ und „Integrated Ocean Drilling Program“, aber auch durch nationale Bohrprogramme (z. B. von Indien, Korea, China und den USA) durchgeführt, können dann detaillierte Abschätzungen zu den Hydratvorkommen erstellt werden. Verschiedene Abschätzungen zum weltweiten Hydratvorkommen haben eine Spanne von ca. 3 000 bis etwa 10 000 Gigatonnen Kohlenstoff ergeben. Auch die Vorkommen in nationalen Hoheitsgebieten wurden untersucht (z. B. für Japan oder Korea), aber es bestehen derzeit keine ökonomisch vielversprechenden Abbauverfahren, die eine kommerzielle Umsetzung der Energiegewinnung aus Gashydraten in den nächsten 10–20 Jahren als wahrscheinlich erachten lassen. Das gilt ebenso für den alternativen Ansatz, Methanhydrate durch komplexe Austauschverfahren mit Kohlendioxid nutzbar zu machen. Zwei der größten Unwägbarkeiten für die kommerzielle Nutzung von Gashydraten sind der globale Marktpreis für Erdgas (derzeit etwa US \$3 pro Tausend Kubikfuß) sowie Fortschritte in der Nutzung von LNG.

## **10. Neue Möglichkeiten für geophysikalische Exploration und Monitoring mit ortsverteilten akustischen Messungen**

Jan Henniges

Deutsches GeoForschungsZentrum GFZ, Potsdam

Neue Technologien zur Nutzung von Erdwärme oder die geologische Speicherung von CO<sub>2</sub> können zur Reduktion von CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Energieerzeugung beitragen. Hierfür ist es notwendig, den geologischen Untergrund zu erkunden und Veränderungen und Prozesse während der Nutzung zu beobachten. Bei der Methode der ortsverteilten akustischen Messungen (Distributed Acoustic Sensing, DAS) handelt es sich um ein neues faseroptisches Verfahren zur Aufzeichnung akustischer Signale, das auf dem Prinzip der optischen Zeitbereichsreflektometrie (optical time-domain reflectometry, OTDR) basiert. Mit der DAS-Methode können Dehnungsänderungen entlang von Sensorkabeln mit hohen Abtastraten (z. B. 1 kHz bei 1 m Datenpunktabstand) über Längen von bis zu 40 km aufgezeichnet werden. Die faseroptischen Sensorkabel sind deutlich robuster als konventionelle Schwingungsaufnehmer, was einen einfacheren und kostengünstigeren Einsatz auch unter rauen Umgebungsbedingungen ermöglicht. Hierdurch ergeben sich völlig neue Möglichkeiten für geophysikalische Anwendungen. Innerhalb des Vortrags werden Feldexperimente zum Einsatz der DAS-Technologie für vertikale seismische Profilierung am Pilotstandort Ketzin (Götz et al. 2018) und am In-situ-Geothermiefeld Groß Schönebeck sowie für seismologische Untersuchungen im Hochtemperatur-Geothermiefeld Reykjanes in Island (Jousset et al. 2018) vorgestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass generell vergleichbare Signale wie mit konventionellen Sensoren aufgezeichnet werden können. Die Messdaten weisen spezifische Charakteristiken auf, die bei der Anwendung und Weiterentwicklung der DAS-Technologie zu berücksichtigen sind.

Götz J, Lüth S, Henniges J, Reinsch T (2018) Vertical seismic profiling using a daisy chained deployment of fibre optic cables in four wells simultaneously – Case study at the Ketzin carbon dioxide storage site. *Geophys Prospect* 66:1201–1214. doi:10.1111/1365-2478.12638

Jousset P, Reinsch T, Ryberg T, Blanck H, Clarke A, Aghayev R, Hersir GP, Henniges J, Weber M, Krawczyk CM (2018) Dynamic strain determination using fibre-optic cables allows imaging of seismological and structural features. *Nature Communications* 9 (1):2509. doi:10.1038/s41467-018-04860-y

## **11. Aspekte der anhaltenden Notwendigkeit von F&T-Aktivitäten hinsichtlich Schießlärm aus Sicht der Bundeswehr**

Thomas Weßling

Wehrtechnische Dienststelle für Waffen und Munition – WTD 91, Meppen

Sowohl der Arbeitsschutz wie auch der Umweltschutz stellen immer höhere Anforderungen an die Arbeitgeber zum Schutz ihrer Arbeitnehmer gegen Lärm. Der Schutz gegen kontinuierlichen Lärm, wie er auch in der Industrie vorkommt, ist hierbei weitgehend geregelt. Die Bundeswehr steht dagegen, wie auch andere waffentragende Organisationsbereiche des Bundes, vor der Problematik, ihre Bediensteten und das Umfeld ihrer Anlagen gegen Impulslärm, in der besonderen Ausprägung Schießlärm, zu schützen. Hinzu kommt der Informationsgehalt im akustischen Ereignis eines Schusses, der zu Aufklärungszwecken nutzbar sein kann.

Zu diesen Bereichen benötigt die Bundeswehr auch weiterhin Erkenntnisse aus den verschiedensten Disziplinen der Forschung hinsichtlich Schießlärms. Diese Notwendigkeiten beginnen bei der Charakterisierung der Quellen in ihren verschiedenen Ausprägungen, reichen über die Ausbreitung der Signale in der Atmosphäre und enden schließlich bei den verschiedenen Empfängern. Hinsichtlich der Empfänger muss hier zwischen technischen Einrichtungen in Aufklärungseinrichtungen und dem Menschen in seiner Eigenschaft als Bediener einer Anlage oder als unbeteiligter Dritter unterschieden werden.

Der Überblicksvortrag stellt die beschriebenen Thematiken in einen engeren Zusammenhang und zeigt die Notwendigkeiten der Bundeswehr hinsichtlich dieses besonderen Forschungsbereiches auf.

## **12. Vergleich von Zeitbereichsmodellen für das Rad-Schiene-Rollgeräusch**

Ina Richter, Jeffrey Thomsen, Katja Stampka, Ennes Sarradj

Fachgebiet Technische Akustik, Technische Universität Berlin

Das Rad-Schiene-Rollgeräusch ist der dominante Anteil des Schienenverkehrslärms bei mittleren Fahrgeschwindigkeiten (50 bis etwa 300 km/h). Durch Unebenheiten auf der Schiene sowie auf der Lauffläche des Rades wird das System zu Körperschallschwingungen angeregt. Diese werden frequenzabhängig sowohl von der Schiene und den Rädern als auch von den Schwellen als Luftschall abgestrahlt.

Es werden zwei Modelle zur Prognose von Rad-Schiene-Rollgeräuschen im Zeitbereich unter Berücksichtigung der vertikalen Kräfte vorgestellt. Die Untersuchung im Zeitbereich hat den Vorteil, dass auch nichtlineare Effekte und die nicht stationäre Rückkopplung zwischen der Kontaktkraft und den Auslenkungen von Rad und Schiene berücksichtigt werden können.

Beide Modelle werden mit Messdaten einer Zugvorbeifahrt verglichen.

## **13. Numerische Simulation der Blasenkollapsdynamik und -interaktion mit fluidischen Gewebegrenzflächen**

Jakob Kaiser, Stefan Adami, Ivan Bermejo-Moreno, Nikolaus A. Adams

Lehrstuhl für Aerodynamik und Strömungsmechanik, Technische Universität München

In diesem Vortrag wird ein Mehrphasenmodell zur Beschreibung kompressibler Strömungen mit diskontinuierlichen Druckstößen und scharfen Phasengrenzen vorgestellt. Mittels einer Level-Set-Formulierung wird die Phasengrenze als Singularität explizit dargestellt und durch Grenzflächentransportterme in den fluiddynamischen Gleichungen berücksichtigt. Die Methode ist eingebettet in einen Finite-Volumen-Code (Eigenentwicklung) und nutzt Multiresolution-Techniken zur adaptiven Gitterverfeinerung. Anwendungsszenario in dieser Arbeit ist der Blasen-

kollaps neben verformbaren fluidischen Grenzflächen. Diese kanonische Konfiguration bildet in erster Näherung die physikalischen Prozesse bei Lithotripsie oder Histotripsie ab, bei denen durch extrakorporale Beschallung Gasblasen in Gewebenähe erzeugt und schließlich zum Kollaps angeregt werden. Die dabei auftretenden gerichteten Strömungen in Richtung angrenzendem Gewebe scheinen entscheidend für die Wirkweise der Behandlungen und sind Gegenstand unserer Untersuchungen.

#### **14. Impulsübertragung und Trägheit, Mechanismen der Steinertrümmerung durch Stosswellen**

Othmar Wess

Storz Medical AG, Tägerwil, Schweiz

Stosswellen werden seit 1980 zur Zertrümmerung von Nierensteinen erfolgreich eingesetzt. Verschiedene Mechanismen der Zertrümmerung sind in verschiedenen Phasen des Prozesses wirksam. Neben der Erzeugung grösserer Bruchstücke durch den Hopkinson-Effekt werden Squeezing und Kavitationsprozesse für die Zertrümmerung in kleinere Fragmente diskutiert. Zur Weiterentwicklung und Verbesserung des Verfahrens in Bezug auf Wirksamkeit und Schädigungsfreiheit ist ein Kenntnis der Zertrümmerungsmechanismen im Detail vorteilhaft.

Laboruntersuchungen an Kunststeinen zeigen, dass Stosswellen an Steinen reflektiert werden und dabei innerhalb von Mikrosekunden einen Impuls übertragen, der zu messbaren Auslenkungen des Steins aus der Ruhelage führt. Der dabei wirksam werdende Kraftstoss erzeugt im Fokus der Stosswelle Kräfte im Bereich von einigen hundert Newton und – je nach Masse – Beschleunigungen im Bereich von 10000 g. Die den punktuell (im Focus) angreifenden Beschleunigungskräften entgegengesetzten Trägheitskräfte sorgen für Spannungen im Stein, die letztlich zum Zerreißen des Steins führen.

Der beschriebene Mechanismus unterscheidet sich wesentlich vom Squeezing-Modell und der Forderung nach einem grossen Focus, wie er in der einschlägigen Literatur häufig gefordert wird.

Kavitation kann den Zertrümmerungsprozess unterstützen, ist aber nach dem Trägheitsmodell nicht zwingend erforderlich, um die durch Spallation entstandenen Bruchstücke in kleinere Fragmente zu zerlegen.

Experimentelle Untersuchungen zum Thema werden präsentiert und diskutiert.

#### **15. Stoßwellen und Druckpulse in der Medizin – Normung im Spagat zwischen medizinischer Anwendung und technischer Umsetzung**

Friedrich Ueberle

Department Medizintechnik, Fakultät Life Sciences, Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg (HAW)

Im Jahr 1980 wurde zum ersten Mal ein Patient mit Hilfe von extrakorporal in einer Wasserwanne durch Funkenentladung erzeugten, fokussierten Stoßwellen von seinem Nierensteinleiden befreit. Damals war man noch nicht in der Lage, die Zeitsignale der Schallimpulse korrekt zu messen. So wurde die Energieeinstellung der ersten, ab 1983 kommerziell vertriebenen Geräte in Form der Ladespannung angegeben, mit der die Generatoren für die Funkenzeugung betrieben wurden. Eine FDA-Vorgabe von 1991 für die Zulassung von Lithotriptern bildete den Ausgangspunkt der ersten Messnorm für Lithotripter-Schallfelder, IEC 61846, die 1998 veröffentlicht wurde. Sie dient seither als Stand der Technik für die Charakterisierung und



Zulassung neuer Geräte, aber auch zur Beschreibung der technischen Parameter bei biologischen Versuchen, Zertrümmerungsmodellen und klinischen Studien. Eine aktuelle Überarbeitung ist in Vorbereitung.

1997 wurde auch eine Sicherheitsnorm für Lithotripter, die IEC 601-2-36 entwickelt. Da zu dem Zeitpunkt (und das ist bis heute so) kein ausreichender Konsens über für Nebenwirkungen wie auch Effizienz relevante akustische Parameter erzielt wurde, beschränkt sich diese Sicherheitsnorm im Wesentlichen auf elektrische und mechanische Sicherheit.

Seit Ende der 1990er Jahre kommen zunehmend unfokussierte Druckpuls-Schmerztherapiegeräte auf den Markt, die bislang noch auf Basis der IEC 61846 vermessen werden. Da die IEC 61846 ausdrücklich für fokussierte Schallquellen ausgelegt ist, führt das leicht zu Fehlinterpretation bei der Beurteilung der Heileffekte und potenziellen Nebenwirkungen, so dass auch Mediziner zunehmend verlässlichere technische Angaben für die Geräte fordern. Daher wird aktuell an einer Messnorm für unfokussierte Druckpulsgeräte (IEC 63045) gearbeitet.

Obwohl Therapien mit Schalldruckpulsen und Stoßwellen seit inzwischen fast 40 Jahren erfolgreich durchgeführt werden, sind viele biologische Effekte und Nebenwirkungen noch nicht oder unvollständig verstanden. Nur durch ständige Weiterentwicklung der Normen kann die Kluft zwischen physikalisch messbaren Parametern und biologisch beobachteten Wirkungen geschlossen werden.

## **16. Limitationen der Übertragbarkeit technischer Stoßwellenparameter auf die mechanobiologische Wirkung**

Matias de la Fuente Klein

Lehrstuhl für Medizintechnik, Helmholtz-Institut für Biomedizinische Technik, RWTH Aachen

Stoßwellen werden heutzutage neben der Steinzertrümmerung in der Urologie in immer mehr therapeutischen Anwendungen eingesetzt, um regenerative Effekte hervorzurufen. Der Erfolg einer Behandlung hängt dabei stark von persönlichen Erfahrungen ab und basiert auf einem begrenzten Parametersatz, um die applizierte Stoßwelle zu beschreiben. Es fehlt immer noch das Wissen, welche Eigenschaften einer Stoßwelle für eine erfolgreiche Behandlung notwendig sind.

Derzeit verwendete Stoßwellenparameter sind bislang nicht in der Lage, das mit dem Gewebe in Wechselwirkung stehende Schallfeld vollständig zu beschreiben – es ist nur innerhalb des Fokus teilweise bekannt. Darüber hinaus wird das Schallfeld stark von Brechung und Dämpfung im Gewebe beeinflusst, so dass die theoretisch im Wasserbad bestimmten Parameter nicht übertragen werden können.

Bei der Anwendung von Stoßwellen und dem Design von klinischen Studien ist es daher besonders wichtig, dass alle Randbedingungen, welche das Schallfeld beeinflussen können, berücksichtigt werden, um die verwendeten Stoßwellenparameter sinnvoll mit der zugrunde liegenden mechanobiologischen Wirkung und dem klinischen Erfolg korrelieren zu können. Aufgrund der Komplexität der räumlichen Schallfeldverteilung spielt hierbei auch die Art und Weise, wie die Stoßwelle appliziert wird, eine entscheidende Rolle.

Beispiele werden präsentiert und diskutiert, die verdeutlichen, dass eine Übertragbarkeit der im Labor gemessenen Parameter auf die klinische Anwendung nur sehr eingeschränkt möglich ist.